

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE TRES TIPOS DE CEMENTO PARA LA FABRICACIÓN DE
CONCRETO SIMPLE FRENTE A ATAQUE QUÍMICO**

Tesis para optar el título profesional de **Ingeniero Civil**

AUTOR

María Elena Ahumada Ponce

ASESOR

Lic. Isabel Díaz Tang

CO-ASESOR

Ing. Julio Carhuamaca Huanri

Lima, junio, 2020

RESUMEN

En el área de construcción el principal material empleado es el concreto debido a la versatilidad en cuanto a forma, las altas resistencias que adquiere con el tiempo, el bajo costo de fabricación y la facilidad de adquirirlo alrededor del mundo. Por ello, este material se ve expuesto a diferentes entornos para desempeñar distintas funciones, entre estas, el almacenamiento o conducción de fluidos, para lo cual debe cumplir con propiedades como baja permeabilidad y durabilidad. El diseño del concreto depende de diversos factores, entre ellos el tipo de cemento, el cual se elige según su composición química y la agresividad del entorno a la que estará sometido el material. Por tanto, la presente tesis investiga la exposición de especímenes de concreto con la finalidad de comparar el desempeño de tres tipos de cemento (I, V y IP) en la fabricación de especímenes de concreto con determinadas características, frente a la acción de dos fluidos agresivos: agua 'pura' (agua destilada) y ácido sulfúrico (concentración de 10 g/L). El primer medio, porque proviene de aguas de lluvia, aguas de manantial o pozos, lo cual es muy típico en la costa y sierra peruana. El segundo, porque es empleado en estructuras de concreto en la industria minera, las cuales abundan en Perú por ser un sector que representa el 10% del PBI del país (MINEM, 2019). Los especímenes de concreto son discos de 6" de diámetro y 1" de alto, con una relación $w/c = 0.5$. Se realizaron ensayos de control de calidad del concreto para evaluar su desempeño, la elaboración de probetas y curado a 28 días según la norma respectiva. Después del tiempo indicado, los grupos de muestras fueron inmersos en los medios de ensayo por 8 semanas. Al culminar el tiempo de exposición, para evaluar y comparar el comportamiento de los especímenes de concreto con los distintos diseños de mezcla, se realizó una inspección visual en los cambios de la morfología del concreto y los ensayos de evaluación de pérdida de masa (por pérdida de pasta de cemento lixiviada), análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) de los especímenes de concreto representativos (evaluación de posibles cambios en la microestructura) y análisis químico mediante espectrometría de masas de plasma inductivamente acoplado (ICP-MS) en las muestras acuosas (determinación de calcio disuelto). Sobre la base de los resultados de estos ensayos, se estableció la opción más viable bajo las condiciones estudiadas.

A Dios por acompañarme siempre y darme la fuerza para obrar cada día en mi vida, más aún en los momentos complicados.

A mis queridos padres Nancy, Margarita y Hugo y mis hermanos por su apoyo incondicional y por enseñarme constantemente a ser mejor profesional.

A mis buenos amigos que apoyaron de diferentes maneras, sobre todo en la parte experimental de esta investigación que costó mucho esfuerzo: Marco, Wilfredo, Eduardo, Giancarlos, Joseph, Jeferson y Francis.

A mis asesores Isabel y Julio por la oportunidad, por su confianza y por ayudarme a aprender nuevas cosas.

Finalmente, a todos aquellos que influenciaron en mí, por su paciencia y motivación pues no me alcanzan las palabras para mostrar mi agradecimiento a todas las buenas personas que he conocido.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Antecedentes	8
1.2 Justificación	9
1.3 Objetivos y Alcances	13
2. MARCO TEÓRICO	
2.1. El concreto	16
2.1.1 El papel del cemento en el concreto	17
2.1.2 Clasificación de los cementos	20
2.2. Conceptos de durabilidad y vida útil	22
2.3 Factores que afectan la durabilidad del concreto	23
2.3.1 Factores referidos al concreto	25
2.3.2. Factores referidos al medio: ataque químico por ácido sulfúrico y aguas puras	29
2.4 Morfología del concreto	
2.4.1 Cambios macroscópicos	35
2.4.2 A nivel microscópico	36
3. MATERIALES	
3.1 Cementos	39
3.2 Agregado grueso y fino	40
3.3 Aditivos	42
4. METODOLOGÍA	
4.1 Diseño de mezclas según el método ACI	43
4.2 Ensayos de control de calidad del concreto	45
4.3 Procedimiento de trabajo	45
4.4 Descripción de los sistemas de estudio y de las condiciones de exposición	46
4.5 Ensayos y determinaciones	
4.5.1 Pérdida de masa	48
4.5.2 Análisis químico para determinación de iones calcio disueltos	48
4.5.3 Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)	49
5. RESULTADOS OBTENIDOS	
5.1 Ensayos de concreto fresco	49
5.2 Ensayos de concreto endurecido	50
5.3 Resultados de inspección visual de los especímenes	51
5.4 Resultados de la determinación de pérdida de masa	61
5.5 Resultados de los análisis químicos	62
5.6 Resultados Microscopía electrónica de barrido SEM	66
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
6.1 Evaluación del tipo de cemento empleado	69
6.2 Evaluación del agregado fino	69
6.3 Evaluación del agregado grueso	71
6.4 Evaluación del concreto fresco	72
6.5 Evaluación del concreto endurecido	73
6.6 Evaluación de la inspección visual	74
6.7 Evaluación de la pérdida de masa	81
6.8 Evaluación de los análisis químicos	84
6.9 Evaluación de la variación del pH	89
6.10 Evaluación de los resultados de microscopía electrónica de barrido SEM	94
7. CONCLUSIONES	96
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Calles de Ayacucho a causa de las inundaciones del 2009. Fuente: RPP, 2017	10
Figura 2: Ciudad de Huamanga después de las inundaciones en el 2017. Fuente: RPP, 2017	10
Figura 3: Piura después de las inundaciones en el 2017. Fuente: RPP, 2017	11
Figura 4: Reparación y protección de cubeto de concreto con sistema epoxy a consecuencia de los derrames de ácido sulfúrico. Fuente: Sintemar (2018).....	12
Figura 5: Distribución de materiales en el concreto. Fuente: PCA, 2004	15
Figura 6: Representación gráfica de la zona de transición y de la pasta de cemento hidratada en el concreto. Fuente: Mehta, 2006.	18
Figura 7: Resistencia de la estructura en el tiempo. Fuente: Cerna y Galicia, 2010.	22
Figura 8: Factores que afectan la durabilidad del concreto. Fuente: IMCYC, 2001.	23
Figura 9: Relación a/c vs coeficiente de permeabilidad. Fuente: Neville, 1981.	25
Figura 10: Deterioro del concreto expuesto a fluidos ácidos. Fuente: Avendaño, 2006.	30
Figura 12: Eflorescencia en el concreto. Fuente: Rojas, 2016.	32
Figura 11: Principio de cómo el agua pura en el sistema de poros disuelve las sustancias de las paredes. Fuente: Ekström, 2001.	32
Figura 13: El examen de secciones finas pulidas de clínker portland muestra la alita (C3S) como cristales angulares y claros. Los cristales más oscuros y arredondados son de belita (C2S). Fuente: PCA, 2004.	36
Figura 14: Imágenes SEM (10000 X y 12000X). Alita y belita en proceso de hidratación. Fuente: Giraldo et. al, 2006.....	36
Figura 15: Imágenes SEM (10000 X y 12000X) Fases hidratadas del cemento. Fuente: Giraldo et. al, 2006.....	37
Figura 16: Determinación del asentamiento y contenido de aire para cada diseño. Fuente: propia.....	48
Figura 17: Especímenes ‘patrón’ de mortero y concreto de cada diseño. Fuente: propia.	50
Figura 18: Registro fotográfico mediante estereoscopio. Fuente: propia.....	50
Figura 19: Disco de mortero con cemento tipo I (izquierda). Burbuja de aire (derecha) (4x). Fuente: propia.....	51
Figura 20: Disco de cemento tipo V (4x). Fuente: propia.	51
Figura 21: Disco con cemento tipo IP (izquierda) (4x). Burbuja de aire en el disco (derecha).	52
Figura 23: Variación del aspecto de la muestra CIP2. Fuente: propia.	53
Figura 22: Variación en el tiempo de la apariencia del medio de ensayo. Fuente: propia.	53
Figura 24: Agregado en relieve en disco con cemento tipo V a las 8 semanas de inmersión (izquierda). Brillo en los extremos del disco (derecha) (4x). Fuente: propia.	54
Figura 25: Solución blanquecina (izquierda). Reacción de la solución con el disco (derecha).	55
Figura 26: Erupciones en el disco (izquierda). Relieve entre agregados y pasta (derecha).	57
Figura 27: Cambios registrados en las muestras. Fuente: propia.	57
Figura 28: Aumento de eflorescencia y disminución de la cantidad de cristales (4x). Fuente: propia.	58
Figura 29: Cambio superficial en el tiempo debido a la lixiviación de la pasta (4x). Fuente: propia. ...	58
Figura 30: Coloración rojiza en el tiempo (4x). Fuente: propia.	58
Figura 31: Agitador magnético (izquierda). Equipo medidor de pH o potenciómetro (centro). Ensayo en proceso (derecha). Fuente: propia.....	61
Figura 32: Tiras reactivas medidoras de pH. Fuente: propia.....	62
Figura 33: Imágenes SEM (500X y 2000X) de fisuras en las muestras CIM0 y CVM0 antes de ser inmersas en los medios (500x).	64
Figura 34: Imágenes SEM (5000X) Variación de la microestructura de las muestras en agua destilada. Muestras en t=0 semanas (izquierda) y en t=8 semanas (derecha). Fuente: propia.	65
Figura 35: Imágenes SEM (5000X) Variación de la microestructura de las muestras en ácido sulfúrico (10 g/L). Muestras en t=0 semanas (izquierda) y en t=8 semanas (derecha). Fuente: propia.	66
Figura 36: Material lixiviado en la base del recipiente con muestras CV (izquierda). Material lixiviado en la base del recipiente con muestras CIP (derecha).	75
Figura 37: Discos a las 8 semanas de inmersión sin diferencias notorias entre ellos. Fuente: propia...	77
Figura 38: Disco de concreto con material lixiviado. Fuente: propia.	78

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2: Granulometría del agregado grueso. Fuente: propia.	40
Gráfico 1: Granulometría del agregado fino. Fuente: propia.	40
Gráfico 3: Propiedades del aditivo reductor de agua. Adaptación del gráfico 5 del Manual de Tecnología para el Hormigón (2010)	41
Gráfico 4: Esquema del procedimiento operativo. Fuente: propia.	43
Gráfico 5: Resumen del protocolo de inmersión. Fuente: propia.	46
Gráfico 6: Variación de la resistencia a la compresión por tipo de cemento. Fuente: propia.	71
Gráfico 7: Pérdida de masa en el tiempo para discos de concreto. Fuente: propia.	79
Gráfico 8: Pérdida de masa en el tiempo para discos de mortero. Fuente: propia.	79
Gráfico 9: Pérdida de masa en el tiempo para discos de concreto. Fuente: propia.	81
Gráfico 10: Pérdida de masa en el tiempo para discos de mortero. Fuente: propia.	82
Gráfico 12: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para mortero. Fuente: propia.	83
Gráfico 11: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para concreto. Fuente: propia.	83
Gráfico 13: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para concreto. Fuente: propia.	85
Gráfico 14: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para mortero. Fuente: propia.	85
Gráfico 15: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de concreto en agua destilada. Fuente: propia.	87
Gráfico 16: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de mortero en agua destilada. Fuente: propia.	88
Gráfico 17: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de concreto en ácido sulfúrico. Fuente: propia.	90
Gráfico 18: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de mortero en ácido sulfúrico. Fuente: propia.	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Óxidos en el cemento. Fuente: Ludwig, 2018.	17
Tabla 2: Productos de hidratación del cemento. Fuente: Giraldo et. All, 2006.	18
Tabla 3: Productos de hidratación del cemento y su influencia en el concreto.	19
Tabla 4: Tipos de cemento convencionales y adicionados según las normas respectivas.	19
Tabla 5: Tipos de cemento en Perú según distribuidor. Fuente: fichas técnicas.	20
Tabla 6: Relaciones w/c para concreto sujeto a exposiciones severas. Fuente: ACI, 1991.	24
Tabla 7: Requisitos del concreto de acuerdo a las condiciones de exposición previstas.	25
Tabla 8: Efectos de sustancias químicas comunes que pueden estar en contacto concreto.	29
Tabla 9: Factores que influyen en el ataque químico. Fuente: ACI, 2016.	29
Tabla 10: Principales ácidos que afectan el concreto. Fuente: Avendaño, 2006.	31
Tabla 11: Factores indicadores de la condición actual de la estructura. Fuente: ACI, 2016.	34
Tabla 12: Indicadores de la debilitación del concreto. Fuente: ACI, 2016.	34
Tabla 13: Resumen de las propiedades del cemento. Fuente: propia.	38
Tabla 14: Resumen de las propiedades de los agregados. Fuente: propia.	39
Tabla 15: Requisitos para el diseño de mezcla. Fuente: ACI, 1991.	42
Tabla 16: Pesos secos por m ³ para cada diseño de mezcla. Fuente: propia.	42
Tabla 17: Costos de cada diseño por m ³ . Fuente: propia.	42
Tabla 18: Resumen de ensayos de control de calidad del concreto. Fuente: propia.	43
Tabla 19: Codificación de mezclas según diseño. Fuente: propia.	45
Tabla 20: Proporción de mezcla según codificación en seco por m ³ . Fuente: propia.	45
Tabla 21: Resumen de ensayos para concreto fresco. Fuente: propia.	48
Tabla 22: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión. Fuente: propia.	49
Tabla 23: Cambios cualitativos en el tiempo de muestras de estudio (los 3 diseños de mezcla) y en el medio de ensayo (agua destilada). Fuente: propia.	52
Tabla 24: Cambios visuales durante la primera semana.	54

Tabla 25: Cambios cualitativos en el tiempo de muestras de estudio (los 3 diseños de mezcla) y en el medio de ensayo (ácido sulfúrico 10 g/L) y muestras de estudio. Fuente: propia.....	56
Tabla 26: Registro de masas en el tiempo para los discos inmersos en agua destilada según el tipo de cemento. Fuente: propia.	59
Tabla 27: Registro de masas en el tiempo para los discos inmersos en ácido sulfúrico 10 g/L según el tipo de cemento. Fuente: propia.	60
Tabla 28: Registro de la cantidad de iones calcio disueltos por espécimen con exposición a agua destilada. Fuente: propia.....	60
Tabla 29: Registro de la cantidad de iones calcio disueltos por espécimen inmerso en solución de ácido sulfúrico. Fuente: propia.....	61
Tabla 30: Registro del pH quincenal con el potenciómetro. Fuente: propia	62
Tabla 31: Registro del pH semanal con las tiras reactivas medidoras de pH. Fuente: propia.....	63
Tabla 32: Registro del pH semanal quincenal con el potenciómetro. Fuente: propia.	63
Tabla 33: Registro del pH quincenal con las tiras reactivas medidoras de pH. Fuente: propia.	63
Tabla 34: Componentes del cemento tipo I y V. Fuente: Ficha técnica cemento.	67
Tabla 35: Resumen del análisis de las propiedades del agregado fino.....	68
Tabla 36: Variación del porcentaje de humedad del agregado. Fuente: propia.....	69
Tabla 37: Resumen del análisis de las propiedades del agregado grueso. Fuente: propia.	69
Tabla 38: Comparativo de los cambios detectados entre las probetas de los distintos diseños. Fuente: propia.....	73
Tabla 39: Comparativo de los cambios detectados entre los distintos diseños. Fuente: propia.	76
Tabla 40: Velocidad de lixiviación referencial en agua destilada durante la semana “t”. Fuente: propia	84
Tabla 41: Velocidad de lixiviación referencial en solución de ácido sulfúrico 10 g/l durante las dos primeras semanas. Fuente: propia.	86

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

g	: gramos
L	: litros
"	: pulgadas
w/c	: relación agua/cemento
NTP	: Norma Técnica Peruana
TM	: Tamaño Máximo
P.U.	: Peso unitario
P.e.	: Peso específico
M.F.	: Módulo de fineza
Wa	: Humedad de absorción
Wo	: Humedad natural

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Cuando se analiza la eficiencia de un proyecto se busca que cumpla tanto su desempeño estructural como su vida de servicio. Por ello, un factor importante de estudio es la durabilidad, la cual a su vez es clave en el análisis de rentabilidad por las repercusiones económicas que tiene este aspecto. Tradicionalmente, el diseño de estructuras se basaba en las propiedades de resistencia mecánica, pero con el tiempo los problemas de deterioro, relacionados al medio que lo rodea, se tornaron un tema de mayor importancia de estudio. Debido a esto, surge la necesidad de investigar los factores que afectan la durabilidad del concreto. (Hernández y Mendoza, 2006).

El concreto es el segundo material más usado en el mundo después del agua (Balaji et. All, 2017), por ejemplo, en el 2016, los productores de concreto de los Estados Unidos fabricaron alrededor de 262'000,000 m³ en todo el año (The Concrete Producer, 2017) y en el 2019, el mismo país tuvo una producción de 89 millones de toneladas métricas (TM) de cemento (The Statics Portal, 2018). En el caso de Perú, ASOCEM registró alrededor de 10 millones de TM de producción de cemento en el 2018 (GESTIÓN, 2018). Un estudio realizado por Sitter asigna un costo relativo de unidad a las decisiones tomadas durante el diseño y planificación e indica que el costo del mantenimiento correctivo tiene un impacto de 125 veces aquel costo de diseño (Avendaño, 2006). Por ejemplo, el Reino Unido destina 40% de la inversión en construcción a la reparación y mantenimiento. Estudios recientes señalan que el 30% del total de causas que afectan la durabilidad de las estructuras se debe a la mala elección de los materiales (Hernández y Mendoza, 2006).

El concreto protege al acero mediante la formación de una barrera física frente al medio de exposición y la formación de una película pasiva que lo protege (Ottazzi, 2017). Sin embargo, existen entornos químicos que acortan la vida útil del concreto, a menos que se

adopten medidas específicas. Por un lado, el cemento Portland no tiene buena resistencia a los ácidos producto de, por ejemplo, combustibles con gases sulfurosos, entornos químicos, aguas residuales o drenajes de agua de algunas minas, etc. (ACI, 2008). Por otro lado, la lixiviación es un fenómeno de arrastre o lavado de la fase soluble en agua del concreto, que induce una progresiva disolución de la portlandita. Este tipo de ataque es normalmente producido por las aguas puras de montaña que tienen una concentración muy baja de iones (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC, 2001), entre otros.

Diversos estudios han mostrado que, en morteros sometidos a ácido sulfúrico, la adición de relleno de piedra caliza, escoria de alto horno y puzolana natural tienen una tasa de pérdida de resistencia del 17%, 18% y 21% respectivamente y 49% para los morteros sin adición (Makhloufi et. all, 2014). Además, morteros con polvo de vidrio tienen una pérdida de masa 15% más bajo que el mortero de simple (Siad et. all, 2016). Por otro lado, se encontró que la porosidad de morteros con polvo de vidrio era de 26% y con cenizas volantes de 28% a comparación del 32% de la pasta simple (Jain y Neithalath, 2009). Actualmente, el mercado peruano solo dispone de cementos convencionales, adicionales y por desempeño limitado definidos por las normas NTP 334.009:2016, NTP 334.090:2016 y NTP 334.082:2016 respectivamente, las cuales permiten validar el uso de cada tipo de cemento como material.

1.2 Justificación

Esta investigación contribuye a evaluar opciones de diseño de mezclas de concreto con miras a reducir el deterioro de concreto por ataque químico que pueden ocurrir en las estructuras de concreto.

Por un lado, en estructuras como canales o colectores que conducen aguas puras (aguas de lluvia, de pozos o manantiales) (Mehta y Monteiro, 2006), su bajo contenido en sales disueltas hace que el agua tenga gran capacidad de disolver las sales de calcio en la pasta de cemento (Sanjuan y Castro, 2001).

En el 2009, se construyó un sistema de drenaje pluvial en Huamanga, Ayacucho. El sistema discurre por debajo de las calles por un canal de diámetro de 2.5 metros. Esto se realizó con la finalidad de evitar inundaciones en la zona (RPP noticias, 2017). Actualmente, este proyecto sigue implementándose en Ayacucho, pues en julio del 2017 se realizó una convocatoria de licitación pública para la contratación de la ejecución de la obra: “Construcción y mejoramiento del sistema de drenaje pluvial en la ciudad de Ayacucho” en su quinta etapa (Municipalidad de Huamanga, 2017). Las figuras 1 y 2 muestran el antes y después de la construcción de dichos drenajes en la ciudad de Ayacucho. Ciudades como esta, donde las lluvias son de intensidad considerable, requieren este tipo de sistemas y al observar el aumento de proyectos de esta naturaleza, se pone en evidencia la necesidad de extenderlo a otras zonas con condiciones climáticas similares.



Figura 1: Calles de Ayacucho a causa de las inundaciones del 2009. Fuente: RPP, 2017



Figura 2: Ciudad de Huamanga después de las inundaciones en el 2017. Fuente: RPP, 2017

Al ser aguas de lluvia las que transportan estas estructuras, pueden ser consideradas aguas ‘puras’, las cuales con el tiempo deterioran el concreto por el fenómeno de lixiviación. Del mismo modo, debido al cambio climático, es posible que algunas zonas que antes no tenían este tipo de eventos los desarrollen con el tiempo, por lo que aquellos drenajes también serían útiles en estos casos. Piura, por ejemplo, ha sufrido constantes inundaciones a causa del Fenómeno del Niño, lo cual el año 2017 causó más de 20 000 damnificados a causa de las inundaciones producidas como se muestra en la figura 3 (RPP noticias, 2017).



Figura 3: Piura después de las inundaciones en el 2017. Fuente: RPP, 2017

Por otro lado, también se estudia la acción de un medio acuoso ácido sobre las distintas mezclas de concreto, como aporte a la reducción del alto porcentaje de deterioro en depósitos de concreto en, por ejemplo, la industria minera, donde son empleados para almacenamiento de los relaves ácidos de minerales o como pozas de lixiviación de minerales con ácido sulfúrico; como también las plantas siderúrgicas, donde las estructuras sufren derrames de ácido sulfúrico durante sus procesos de producción de metales. Uno de los usos típicos de este ácido es para la lixiviación del cobre, debido a su bajo costo, bajo consumo de energía, baja emisión de gases, entre otras razones (Instituto Europeo del Cobre, 2018). Se proyecta que para el 2020, el Perú producirá aproximadamente 6,7 millones de toneladas de ácido sulfúrico, tanto para el país como su exportación, debido a su uso significativo en la minería (InfoMine, 2011).

Los materiales de construcción son limitados debido a la naturaleza corrosiva de la solución que contiene ácido sulfúrico, por lo que el concreto se prepara con aditivos para mejorar la densidad y normalmente es revestido interiormente con cemento bituminoso, asfalto o plástico laminado y fibra de vidrio (911 Metallurgist, 2016), recubrimientos de polietileno de alta densidad o recubrimientos con base epoxy tal como se muestra en la figura 4. Ante ello, se busca saber qué le puede ocurrir al concreto cuando dichos revestimientos fallan en su función protectora.



Figura 4: Reparación y protección de cubeto de concreto con sistema epoxy a consecuencia de los derrames de ácido sulfúrico. Fuente: Sintemar (2018)

Adquiriendo un mayor conocimiento de los mecanismos de deterioro y aplicando técnicas de estudio y evaluación del desempeño de especímenes de concreto a escala de laboratorio se puede proponer metodologías para comparar el desempeño de diversos productos y formulaciones. La presente investigación compara el cemento Portland más empleado en el Perú; es decir, el tipo I con el cemento tipo V, como alternativa debido a que se emplea en concretos expuestos a la acción severa a sulfatos en complemento de una baja relación agua material cementante (PCA, 2004). Además, se compara el cemento Portland puzolánico (tipo IP), pues alcanza similar resistencia a la compresión final que el cemento tipo I, así como también presenta buena resistencia al ataque ácido y por sulfatos (Ghrici, Kenai y Meziane, 2006). Durante las últimas décadas, el uso de adiciones minerales como sustituto parcial del cemento Portland en el concreto se ha vuelto muy popular debido

a sus ventajas tecnológicas, económicas y ambientales. Estas adiciones permiten una mejora de la resistencia del concreto al ataque de agentes agresivos (ácido sulfúrico), pues reduce la presencia de hidróxido de calcio, que es el componente más vulnerable a este tipo de ataque (Makhloufi et. Al., 2014).

En el año 2017, se anunció que, en los próximos dos años, 15 proyectos mineros iniciarían procesos de construcción e ingresarían a la etapa de producción con un total de US\$14.637,47 millones en inversiones (América Economía, 2017). En esta considerable cantidad de proyectos de minería, el concreto de sus pozas de lixiviación de minerales debe mostrar un adecuado desempeño frente a los ácidos que puedan ser empleados. Ante estas inversiones y dada su magnitud, queda en evidencia la necesidad de realizar estudios de durabilidad en diversas estructuras de concreto armado. En los dos ejemplos mencionados, la exposición a los agentes químicos que son materia de estudio en la presente tesis que justifica la importancia de esta investigación.

Hipótesis:

- La mejor alternativa en relación a durabilidad para estructuras de concreto simple frente a exposición a agua destilada y ácido sulfúrico es el cemento IP, al cual le sigue el tipo V y este el tipo I.
- La velocidad de deterioro de los especímenes es mayor al inicio de exposición.

1.3 Objetivos y Alcances

Objetivo general:

Determinar el tipo de cemento que ofrece un mejor desempeño para estructuras de concreto simple frente a la exposición a aguas destilada y ácido sulfúrico.

Objetivos específicos:

- Evaluar el comportamiento de tres tipos de cemento Portland (I, V y IP) en concreto simple frente a ataque por aguas destilada y soluciones de ácido sulfúrico.
- Evaluar y comparar el grado de ataque frente a aguas destilada y ácido sulfúrico mediante ensayos de inmersión a escala de laboratorio y utilizando las técnicas de pérdida de masa,

microscopía electrónica de barrido, así como análisis químicos para la determinación de iones calcio disueltos para la evaluación de resultados.

- Determinar la mejor opción de cemento a utilizar en estructuras que almacenen o conduzcan agua destilada y medios acuosos conteniendo ácido sulfúrico.

Alcance

Los resultados de esta investigación pueden servir como una guía u orientación en cuanto al comportamiento de los cementos tipo I, tipo V y tipo IP en sus respectivos diseños de mezcla para concreto y mortero con fines comparativos, frente al ataque químico de dos medios: aguas puras y soluciones de ácido sulfúrico. Los resultados también proporcionan información acerca del comportamiento y los posibles cambios de la microestructura de los diferentes diseños ante las soluciones indicadas tras exposición por aproximadamente dos meses bajo condiciones de laboratorio.

El ensayo experimental se realizará mediante una simulación a escala de laboratorio. Los daños provocados por las reacciones químicas, pueden presentarse tanto inmediatamente después del contacto, como a largo plazo (Avendaño, 2006). Por ello, para acelerar el proceso, basados en investigaciones reportadas en la literatura, se tendrán las siguientes consideraciones:

- Mayor relación área/volumen del espécimen. Esto permite acelerar el proceso de deterioro o penetración de los agentes químicos.

• Exposición continua a los medios de ensayo. En condiciones reales las estructuras suelen estar expuestas intermitentemente o por cortos períodos a los medios agresivos; en el presente estudio se trata de obtener datos en menor tiempo mediante una exposición continua a los medios de ensayo. En los procesos reales el medio se renueva constante o periódicamente, mientras que en el estudio de laboratorio los medios de ensayo serán renovados quincenalmente. Esto tiene sentido si se tiene en cuenta que los cambios – en los especímenes de concreto y en la composición química de los medios de ensayo – serán más evidentes tras periodos más prolongados, en comparación con una evaluación diaria.

- En el caso del ácido sulfúrico, una concentración de 10g/L.

Con relación a las limitaciones de la investigación se pueden mencionar las siguientes:

- La ausencia de acción erosiva por parte de los fluidos, pues al no estar en movimiento el proceso de deterioro no puede verse acelerado o incrementado. En un análisis estático, la pasta deteriorada se mantiene en el espécimen y el fluido debe atravesarla, por lo cual el proceso es un poco más lento. La erosión, en cambio, contribuye retirando el material deteriorado, lo cual permite el contacto más rápido de los agentes agresivos.
- Los medios acuosos son artificiales; es decir, no son aguas de manantial ni soluciones ácidas empleadas en las pozas de relaves mineros (Nele De Belie, 2007). Además, se selecciona una concentración específica (10g/L) de ácido sulfúrico en el medio acuoso, mientras que en la práctica las concentraciones son variables.
- La relación $w/c=0.5$ definida en los diseños de mezcla propuestos limita la aplicabilidad directa de los resultados de este estudio para casos con dicha relación.
- El tamaño de los especímenes es distinto al de una estructura real. Esta diferencia, por ejemplo, en los acabados de ambos casos puede ser un factor limitante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El concreto

Actualmente, la producción de concreto es mucho mayor que hace 40 años y se estima que el consumo de este material es de alrededor 11 mil millones de toneladas métricas anualmente (Mehta, P. K., & Monteiro, 2017).

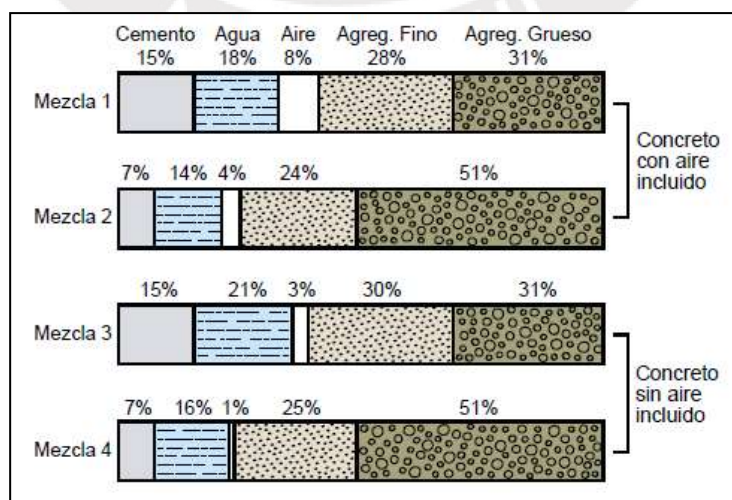


Figura 5: Distribución de materiales en el concreto. Fuente: PCA, 2004

El concreto es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta por cemento portland y agua, permite la unión de los agregados para la formación de una masa resistente como se muestra en la figura 5. Esto debido a la reacción química que se genera con la hidratación del cemento. Además, se pueden incluir otros materiales cementantes o adiciones en la pasta (PCA, 2004)

El concreto, debido a sus propiedades, debe cumplir cuatro funciones principales. En primer lugar, la mezcla en estado fresco debe ser trabajable, consistente y cohesiva para facilitar la colocación, sin producir segregación o alta exudación. En segundo lugar, el concreto en estado endurecido debe tener las propiedades de acuerdo a la función del uso de la estructura. En tercer lugar, que el costo sea el mínimo necesario para la calidad deseada (Rivva, 2000). Por último, debe ser durable ante las condiciones de exposición a las que está sujeto; es decir, mantener sus propiedades ingenieriles (Elizondo, 2013).

2.1.1 El papel del cemento en el concreto

El cemento Portland es de tipo hidráulico, en base a silicatos hidráulicos de calcio. La reacción química con el agua ocasiona la fragua y endurecimiento de este material, de aquí se obtiene la formación de pasta. Al adicionar los agregados, la pasta actúa como adhesivo y une los agregados para la formación del concreto (PCA, 2004).

Las características físicas y químicas de los componentes mostrados en la figura 5 determinan las propiedades del concreto (Rivva, 2000). Si bien los porcentajes de cemento mostrados no corresponden a la mayoría del volumen de mezcla, es la pasta de cemento la que otorga la mayoría de las propiedades del concreto, por lo cual se convierte en un material de suma importancia.

La relación w/c influye en la resistencia del concreto de manera que, conforme esta aumenta, disminuye la resistencia a la compresión y viceversa; fenómeno que también afecta a la resistencia a la flexión, tracción, entre otros (Elizondo, 2013). Por otro lado,

la permeabilidad del concreto también depende de la relación w/c, pues esta define el tamaño, volumen y continuidad de los vacíos, lo cual favorece el ingreso de agentes externos que pueden deteriorar el concreto y favorecer la corrosión de la armadura (Bustamante, 2016).

a) Materias primas

El cemento está compuesto principalmente por calizas como silicatos cálcicos y arcillas que aportan sílice, alúmina y hierro. Lo más importante en cantidad es la cal y luego la sílice, los cuales conforman aproximadamente entre el 70% al 75% del total del clínker (Rivva, 2000). El cemento Portland es producto de las materias primas anteriormente mencionadas, en cuya composición, se encuentran los óxidos que a continuación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Óxidos en el cemento. Fuente: Ludwig, 2018.

Elemento presente	Expresión como óxido	Notación en cemento
Calcio (Ca)	CaO	C
Silicio (Si)	SiO ₂	S
Aluminio (Al)	Al ₂ O ₃	A
Hierro (Fe)	Fe ₂ O ₃	F
Azufre (S)	SO ₃	-
Oxígeno (o agua)	H ₂ O	H

b) Composición del cemento

Después de la reacción química entre compuestos, se obtienen los siguientes productos:

- **Silicato tricálcico o alita**, C₃S. Influye en el inicio de fragua y resistencia inicial (1 semana), pues se hidrata y se endurece rápidamente. A mayor contenido, mayor resistencia inicial (PCA, 2004).
- **Silicato dicálcico o belita**, C₂S. Influye en las resistencias a largo plazo, pues su hidratación y endurecimiento es lento (PCA, 2004).
- **Aluminato tricálcico o aluminato**, C₃A. Condiciona el fraguado violento y en cierta medida las resistencias tempranas, pues libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento, lo cual hace que aumenta la velocidad

de las reacciones químicas. Para controlar ello, se emplea el yeso en un porcentaje pequeño. Los cementos con bajos porcentajes de C_3A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos (PCA, 2004).

- **Ferroaluminato tetracálcico o ferrita, C_4AF .** Influye en la velocidad de hidratación de manera secundaria y contribuye muy poco para la resistencia. Los efectos de color gris del cemento se deben a este compuesto y sus hidratos (Ludwig, 1974).

c) Hidratación del cemento:

Se desarrolla en función de la reacción de los componentes anteriormente mencionados y el agua:

Tabla 2: Productos de hidratación del cemento. Fuente: Giraldo et. All, 2006.

C_3S + agua	Silicato de calcio hidratado (tobermorita gel) + hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) ... (1).
C_2S + agua	Tobermorita gel + hidróxido de calcio, pero a diferencia de (1) se produce menos hidróxido de calcio.
C_3A + hidróxido de calcio + agua	Aluminato de calcio hidratado
C_3A + yeso + agua	Etringita
C_3A + etringita + agua	Monosulfato

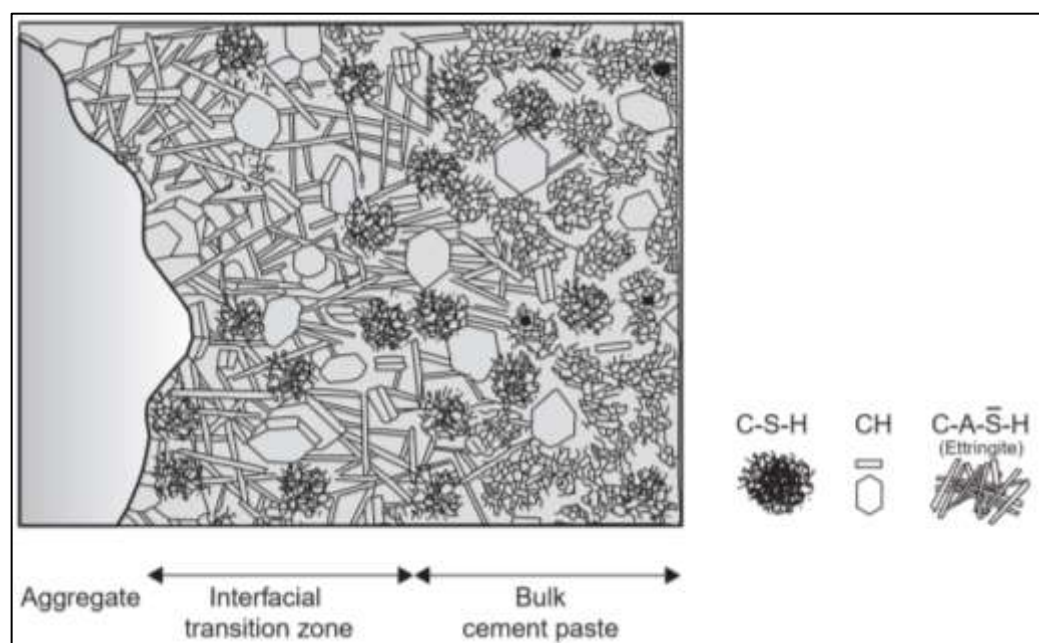


Figura 6: Representación gráfica de la zona de transición y de la pasta de cemento hidratada en el concreto. Fuente: Mehta, 2006.

Los productos obtenidos influyen en:

Tabla 3: Productos de hidratación del cemento y su influencia en el concreto.

Tobermorita gel (CSH)	Es responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, la adherencia de la misma con los agregados (en morteros y concretos) y la resistencia mecánica de los conglomerados (Calleja, 2001).
Portlandita (CH)	Mantiene el pH de la pasta en valores altos (12-13), protege la armadura del concreto contra la corrosión electroquímica a causa de su alta alcalinidad (Calleja, 2001) y contribuye en la adherencia árido calizo-pasta. Sin embargo, como efecto negativo, es soluble en agua y fácil de lixiviar por disolución. Además, puede reaccionar con sulfatos y generar procesos de expansión y ruptura, como la formación de etringita. Ello podría controlarse con adiciones minerales (Giraldo et. All, 2006).
Etringita (C-A-S-H)	Genera expansión y se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas (Giraldo et. All, 2006).

2.1.2 Clasificación de los cementos

Como se mencionó anteriormente el cemento es el principal componente del concreto, debido a que actúa como ligante de toda la masa al mezclarse con agua. Por ello, dada la gran variedad de cementos se debe hacer un análisis de sus propiedades para la función requerida previo a su uso (Sanjuán y Castro, 2000).

Tabla 4: Tipos de cemento convencionales y adicionados según las normas respectivas.

Cementos Portland según la NTP 334.009:2016 (norma base ASTM C150-18)		Cementos adicionados según la NTP 334.090:2016 (norma base ASTM C595-18)	
Tipo I	Normal	Tipo IS	Cemento portland alto horno
Tipo IA	Normal con aire incluido	Tipo IP y Tipo P	Cemento portland puzolánico
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos	Tipo I (PM)	Cemento portland modificado con puzolana
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido	Tipo S	Cemento de escoria o siderúrgico
Tipo III	Alta resistencia inicial	Tipo I (SM)	Cemento portland modificado con escoria
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido		
Tipo IV	Bajo calor de hidratación		
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos		

En general existen normas que controlan los tipos de cemento existentes según sus

características. Las normas ASTM son empleadas internacionalmente y las NTP en Perú, estas últimas tienen como base las primeras y establecen los requisitos de desempeño del cemento según el tipo. De acuerdo a las normas la clasificación puede variar entre cementos convencionales, adicionados o por desempeño. De los cuales algunos son detallados en la tabla 4.

Los cementos en Perú

La tabla 5 detalla los cementos comercialmente disponibles en el mercado peruano, donde se puede apreciar que entre las diferentes distribuidoras de cemento los tipos comunes en cementos estándares son del Tipo I y Tipo V. En cuanto a los adicionados o por desempeño, se encuentran los de tipo IP y HS.

Tabla 5: Tipos de cemento en Perú según distribuidor. Fuente: fichas técnicas.

DISTRIBUIDOR	CEMENTOS ESTÁNDARES	CEMENTOS ADICIONADOS O POR DESEMPEÑO
UNACEM	Cemento Andino tipo I	Cemento Andino tipo IP (tipo IP).
	Cemento Sol (Pórtland tipo I).	Cemento Andino tipo IPM (tipo IPM)
	Cemento Andino tipo V	Cemento Andino Ultra (HS/MH/R)
PACASMAYO	TIPO I	EXTRA ULTRA ARMADO (TIPO IL)
	TIPO V	EXTRA EXTRAFORTE (TIPO IC ₀)
		FORTIMAX (TIPO MS/MH)
CEMEX PERÚ (QUISQUEYA)	USO ESTRUCTURAL	
	USO GENERAL	
	USO ZONA COSTERA	
YURA		CEMENTO MULTIPROPÓSITO Alta durabilidad (TIPO IP)
		CEMENTO INDUSTRIAL Ultra Resistencia Inicial (Tipo HE)
		CEMENTO ANTISALITRE Ultra Impermeabilidad (Tipo HS)

Los factores importantes que controlan el deterioro del concreto, además de la resistencia, son la calidad de la superficie del concreto terminado y la agresividad del ambiente. Controlar el medio ambiente no es posible, por lo tanto, para mejorar la vida útil de las estructuras, las estrategias deben enfocarse en la calidad de la construcción, incluida la de los materiales (Bapat, 2012).

2.2. Conceptos de durabilidad y vida útil

En la literatura técnica se pueden encontrar diversas definiciones de 'durabilidad', entre las cuales se pueden citar algunos ejemplos.

La durabilidad del hormigón puede definirse como la capacidad del hormigón para ofrecer un comportamiento adecuado, en el transcurso de la vida de servicio del elemento estructural (Ministerio de Obras Públicas y Transporte, 1989).

Además, con respecto a la corrosión, se define durabilidad como la capacidad de un sistema para mantener la capacidad de servicio durante un tiempo específico cuando se han cumplido los requisitos especificados de uso y mantenimiento (ISO 8044, 1999).

Según el ACI 201.2R-16 "Guide to Durable Concrete": La durabilidad del concreto se define como su resistencia a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable debe mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto al entorno para el cual fue diseñado (ACI, 2016).

Por otro lado, según el Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, se define la vida útil de una estructura como "el periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, seguridad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente" (Uller, 2008). Las obras de ingeniería se proyectan para su empleo en un lapso de tiempo determinado, que se conoce como tiempo de vida útil. Por ejemplo, las edificaciones comunes en Perú se diseñan para un tiempo de vida útil de 50 años, muchos de los puentes para 100 años y, en raras ocasiones, plantas nucleares, para 500 años (Muñoz, 1999).

La figura 7 muestra las fases del deterioro del concreto hasta llegar al colapso, en donde T_1 y T_2 corresponden a los periodos de iniciación y de propagación del deterioro, respectivamente. ELS es el punto en el tiempo en el cual la estructura ha culminado su vida útil, considerando que conllevará la manifestación de daños externos. Además, ELU es el estado en que un elemento o estructura está cercana al colapso o falla estructural; es decir, el tiempo ante un estado de degradación inaceptable antes de que sufra un colapso inminente (Cerna y Galicia, 2010).

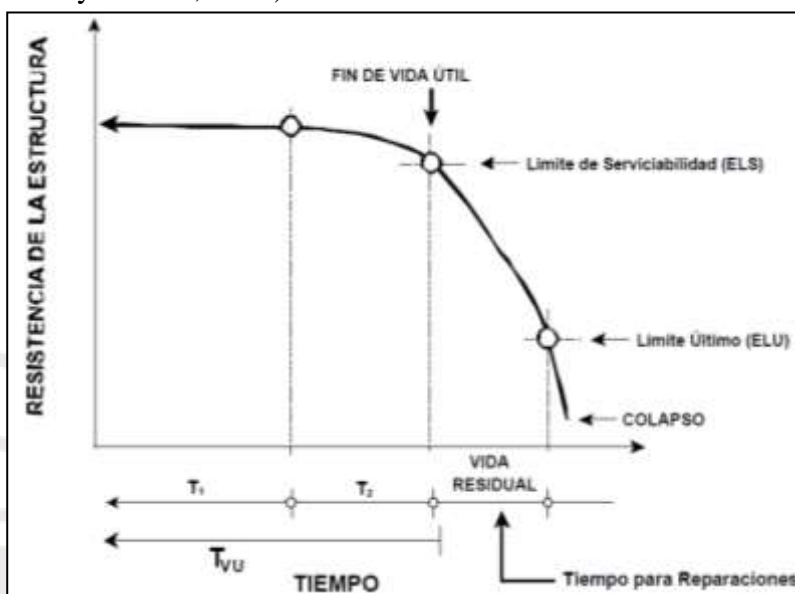


Figura 7: Resistencia de la estructura en el tiempo. Fuente: Cerna y Galicia, 2010.

2.3 Factores que afectan la durabilidad del concreto

En el concreto armado, la durabilidad dependerá tanto de las características del concreto y del acero como de la interrelación entre ambos, dichos factores son descritos en la figura 8. Por un lado, la estructura porosa influye de forma decisiva sobre la accesibilidad de agentes agresivos externos, incluso el contenido de fase líquida en los poros influye enormemente en la velocidad de difusión de gases e iones. Por otro lado, dicha fase acuosa actúa como medio electrolítico en los procesos de corrosión del acero.

El agua, en los sólidos porosos, está normalmente involucrada en todas las formas de deterioro, la facilidad de penetración del fluido en el material determina su tasa de deterioro (Mehta y Monteiro, 2006)

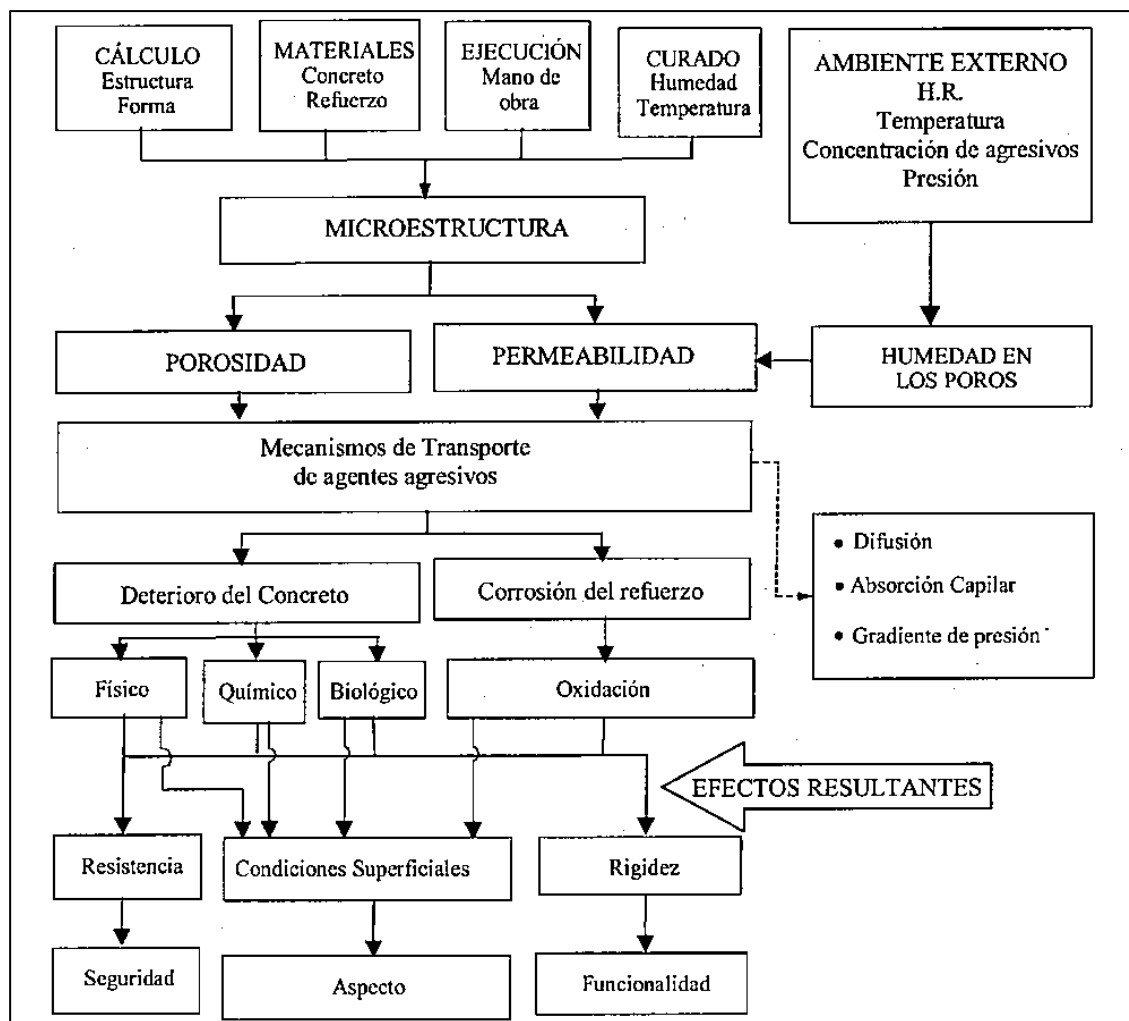


Figura 8: Factores que afectan la durabilidad del concreto. Fuente: IMCYC, 2001.

En cuanto a los agentes externos se pueden clasificar en dos grupos. Por un lado, los efectos físicos que afectan la durabilidad del concreto son: el desgaste de la superficie, agrietamiento a causa de la cristalización de sales en los poros y exposición a temperaturas extremas. Por otro lado, los efectos químicos nocivos incluyen: soluciones ácidas que lixivian la pasta de cemento, reacciones expansivas por ataque de sulfatos, reacciones de álcali-agregado y corrosión del acero en el concreto (Mehta y Monteiro, 2006).

2.3.1 Factores referidos al concreto

En cuanto a este aspecto la guía ACI 201.2R-16 recalca la influencia de los siguientes puntos: estructura porosa, efectos de mezclado, colocación y compactación, entre otros. La resistencia a la compresión del hormigón, medida en condiciones controladas de laboratorio, no es un indicador adecuado de la durabilidad del hormigón porque no tiene

en cuenta las variables del proceso de construcción, como la colocación, la compactación y el curado; las cuales afectan significativamente la calidad de la zona de superficie del concreto. De esta manera, tiene una influencia directa en la durabilidad, al controlar el ingreso de sustancias nocivas del ambiente hacia el concreto (ACI, 2016).

a) Estructura porosa

Los métodos de mezclado y colocación de concreto fresco influyen en la disposición final de la estructura de poro del concreto. La estructura global de los poros y su relación con los mecanismos de transporte, la permeabilidad y la porosidad intervienen significativamente en la durabilidad. El transporte de agentes nocivos en el concreto también afecta la durabilidad de las estructuras. La velocidad, el alcance y el efecto del transporte dependen en gran medida de la estructura de poros del hormigón (cantidad, forma, tamaño de poros y distribución del tamaño de poro) (ACI, 2016).

Como se mencionó anteriormente, la permeabilidad del concreto también depende de la relación w/c, pues esta define el tamaño, volumen y continuidad de los vacíos (Bustamante, 2016). El ACI 211.1S-91, Guía para el proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo establece que, para estructuras continuamente húmedas, la relación w/c debe ser menor o igual que 0.5 (ACI, 1991).

Tabla 6: Relaciones w/c para concreto sujeto a exposiciones severas. Fuente: ACI, 1991.

Relaciones agua/cemento o agua/materiales cementantes máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas		
Tipo de estructura	Estructura continuamente húmeda o frecuentemente expuesta a congelamiento y deshielo	Estructura expuesta a agua de mar o sulfatos
Secciones delgadas (bardas, bordillos, cornisas y trabajos ornamentales) y secciones con menos de 5 mm de recubrimiento para el refuerzo	0.45	0.40
Todas las estructuras	0.50	0.45

Por otro lado, la tabla 6, de la misma guía, indica que para estructuras expuestas a agua de mar o sulfatos en las que se empleen cementos resistentes a sulfatos (Tipo II o Tipo V), la relación w/c o w/mc se puede incrementar en 0.05. Es decir, en ese caso para

todas las estructuras se emplearía una relación de 0.5. Sin embargo, en el caso del cemento tipo I, esta debería ser menor ($w/c=0.45$).

Por otro lado, la tabla 7, adaptada de la norma E060, plantea una serie de requisitos para el concreto expuesto a soluciones con sulfatos. Se puede apreciar que la máxima relación w/c , que cumple los requisitos de la norma, es de 0.5 para condiciones especiales de exposición. Sin embargo, esta es bajo una exposición moderada.

Tabla 7: Requisitos del concreto de acuerdo a las condiciones de exposición previstas.

Fuente: Norma E.060, 2009.

Exposición a sulfatos	Sulfato soluble en agua (SO_4) presente en el suelo, porcentaje en peso	Sulfato (SO_4) en el agua, ppm	Tipo de Cemento	Relación máxima agua - material cementante (en peso) para concretos de peso normal*	f'_c mínimo (MPa) para concretos de peso normal y ligero*
Insignificante	$0,0 \leq SO_4 < 0,1$	$0 \leq SO_4 < 150$	—	—	—
Moderada**	$0,1 \leq SO_4 < 0,2$	$150 \leq SO_4 < 1500$	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0,50	28
Severa	$0,2 \leq SO_4 < 2,0$	$1500 \leq SO_4 < 10000$	V	0,45	31
Muy severa	$2,0 < SO_4$	$10000 < SO_4$	Tipo V más puzolana***	0,45	31

En la figura 9 se observa que el coeficiente de permeabilidad aumenta notoriamente a partir de relaciones w/c superiores a 0.6 (Neville, 1981). Por tanto, es de suma importancia controlar la relación w/c en estructuras que estén expuestas a fluidos, especialmente si estos son agresivos para el material.

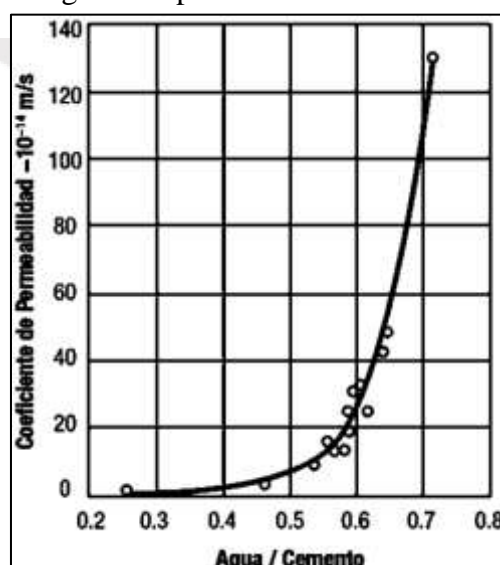


Figura 9: Relación a/c vs coeficiente de permeabilidad. Fuente: Neville, 1981.

b) Efecto del mezclado

Los métodos de mezclado del concreto empleado pueden tener efectos muy significativos sobre las propiedades de este material, el contenido de aire, el asentamiento, entre otros. Se debe asegurar que el concreto colocado tenga las propiedades necesarias para proporcionar la durabilidad requerida de forma anticipada ante el uso y exposición del concreto.

Los tiempos de mezcla prolongados pueden, por un lado, aumentar el contenido de aire (ACI, 2016), lo cual contribuye con el incremento de vacíos en la estructura. Por otro lado, incrementan la temperatura del concreto, lo cual influye en la pérdida de asentamiento rápida, especialmente en climas cálidos (ACI, 2016). Esto dificulta la colocación del concreto y causa la aparición de cangrejeras. Dichos vacíos y oquedades favorecen el ingreso de agentes externos que afectan la durabilidad del material.

c) Colocación y compactación

Los métodos pueden influir de forma importante en la cantidad de aire retenido en el concreto. Por ejemplo, una caída libre excesiva del concreto a través de las barras de refuerzo puede impedir la consolidación adecuada y, por tanto, afectar la durabilidad del material. Existen algunas recomendaciones en el ACI 304.R-00: Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete (ACI, 2000) para realizar estos procesos.

La consolidación es necesaria para obtener las propiedades de resistencia y durabilidad requeridas a lo largo de la vida útil de estructuras de concreto. Una adecuada proporción de concreto y forma de vibrado garantizan ello. La vibración tiene como función eliminar principalmente los vacíos de aire más grandes. Por ello, la consolidación adecuada es necesaria para obtener baja permeabilidad, que es fundamental para aumentar la resistencia a la intemperie y a la mayoría de los agentes de deterioro.

La baja permeabilidad se puede lograr también con mezclas de concreto diseñadas para una buena trabajabilidad y capacidad de colocación; guías como ACI 211.1-91 es referente para seleccionar las proporciones de la mezcla, y ACI 309R-05: “Guía para la compactación del concreto” brinda sugerencias para consolidar el concreto.

Los métodos de colocación y consolidación deben tener un cuidadoso seguimiento para alcanzar las propiedades requeridas en el concreto fresco (ACI, 2016).

d) Curado del concreto

La importancia del curado del concreto para el desarrollo de propiedades de resistencia y durabilidad es significativa. El curado es un proceso para prevenir la pérdida de humedad del concreto, mientras se mantiene un régimen de temperatura satisfactorio, lo cual es particularmente importante cuando la relación w/c es baja. Un mal curado, aparte de disminuir la resistencia, causa dos principales efectos: el aumento de poros en el concreto y el aumento de fisuras a causa de la retracción plástica o por secado, ambas consecuencias facilitan el ingreso de agentes agresivos (Bapat, 2012).

2.3.2. Factores referidos al medio: ataque químico

La durabilidad representa una de las características clave del concreto pues le permite conservar su forma original, calidad y capacidad de servicio cuando se expone a su entorno. Este material bien diseñado, proporcionado, colocado, terminado, probado, inspeccionado y curado es capaz de brindar décadas de servicio con poco o ningún mantenimiento. Sin embargo, existen condiciones o entornos que influirán en un determinado deterioro. Estos mecanismos agresivos pueden ser de naturaleza química, física o mecánica, y se originan en fuentes externas o internas (ACI, 2016).

La actuación de los agentes agresivos externos depende del entorno en donde se encuentran y de la velocidad de penetración, según sea su mecanismo de transporte y las condiciones en las que se realice. Estos agentes agresivos se pueden encontrar en estado

gaseoso, líquido o formando parte de suelos adyacentes al concreto (IMCYC, 2001). Entre los principales factores que afectan la durabilidad del concreto, el ACI 201.2R - 16 destaca los siguientes: ciclos de hielo y deshielo, reacción álcali-agregado, ataque químico, abrasión y carbonatación.

Además, cualquier ambiente con pH menor que 12.5 puede ser agresivo, pues una reducción de la alcalinidad en el fluido de los poros podría desestabilizar los productos cementicios de la hidratación. Por lo tanto, la mayoría de las aguas industriales y naturales son potencialmente agresivas para el concreto. Sin embargo, la tasa de ataque químico depende del pH del fluido agresivo, de su naturaleza química y de la permeabilidad del material. Si la permeabilidad es baja y el pH del fluido agresivo es mayor que 6, la tasa de ataque puede ser casi insignificante.

Ataque químico

Una estructura de concreto adecuadamente diseñada y lograda funcionará satisfactoriamente cuando se exponga a diversas condiciones atmosféricas. Sin embargo, existen algunos entornos químicos que pueden acortar la vida útil, a menos que se tomen medidas específicas. Para ello, es necesario comprender las condiciones a las que el material se someterá, a fin de evitar el deterioro o reducir la velocidad de este (ACI, 2016). Entre los agentes químicos que deterioran el concreto se encuentran: el ataque de ácidos, el ataque de sulfatos y la carbonatación (Avendaño, 2006).

El ataque al concreto puede ser significativo dependiendo de: la concentración de la solución agresiva (que debe estar por encima de una concentración mínima), y la presión del fluido con la que está en contacto (esta tiende a forzar a la solución agresiva al concreto) (ACI, 2016). La guía ACI 201.2R - 16 proporciona una tabla resumen de los efectos de algunas sustancias químicas comunes. En ella se señala que el ácido sulfúrico tiene una tasa de ataque rápido, en comparación con las aguas blandas que tienen una tasa

baja. La tabla 8 muestra los efectos comunes en el concreto expuesto a sustancias químicas. Por otro lado, la misma guía señala la importancia en la elección de los materiales pues siempre que se haya tenido el cuidado debido en ello y en la dosificación de la mezcla de concreto, los factores más importantes que influyen en la capacidad del material para resistir el deterioro se muestran en la tabla 9 (ACI, 2016).

Tabla 8: Efectos de sustancias químicas comunes que pueden estar en contacto concreto.

Fuente: Guía ACI, 2016.

Efectos del uso común de químicos en el concreto					
Tasa de ataque a Ambiente	Ácidos inorgánicos	Ácidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Varios
Rápido	Clorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Lático	-	Cloruro de aluminio	-
Moderado	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio > 20%	Nitrato de amonio y Sulfatos (de amonio, de sodio, de magnesio, de calcio)	Bromo (gas) Licor de sulfito
Lento	Carbónico	-	Hidróxido de sodio 10 - 20% Hipoclorito de sodio	Cloruro amónico Cloruro de magnesio Cianuro de sodio	Cloro (gas) Agua de mar Aguas Puras
Despreciable	-	Oxálico Tartárico	Hidróxido de sodio < 10 % Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de sinc Dicromato de sodio	Amoniaco (líquido)

Tabla 9: Factores que influyen en el ataque químico. Fuente: ACI, 2016.

Factores que aceleran o agravan el ataque	Factores que mitigan o retrasan el ataque
1. Alta porosidad debido a: i. Alta absorción de agua ii. Permeabilidad iii. Vacíos	1. Concreto denso logrado por: i. Proporción adecuada de mezcla. ii. Reducción del contenido de agua de la unidad iii. Aumento de material cementoso contenido iv. Arrastre de aire. v. Consolidación adecuada. vi. Eficaz curado
2. Grietas y separaciones debido a: i. Concentraciones de esfuerzos ii. Choque térmico	2. Menor esfuerzo de tracción en concreto por: i. Usando el refuerzo extensible de tamaño adecuado, ubicado correctamente. ii. Inclusión de puzolana (para reducir el aumento de temperatura). iii. Provisión de adecuadas articulaciones de contracción.
3. Lixiviación y penetración de líquidos debido a: i. Fluido líquido. ii. Estancamiento. iii. Presión hidráulica.	3. Diseño estructural: i. Para minimizar las áreas de contacto y turbulencia. ii. Suministro de membranas y sistemas de barrera protectora a reducir la penetración.

a) Ácido sulfúrico

El concreto es un material silicio-calcáreo y tiene un fuerte carácter básico (pH alrededor de 13), lo cual lo hace vulnerable frente a cualquier fluido ácido. El deterioro consiste en la disolución o pérdida de la pasta del cemento a causa de las reacciones que se producen entre los ácidos y los compuestos cálcicos del cemento hidratado (hidróxido, silicato y aluminato de calcio) (Avendaño, 2006). Este proceso, ilustrado en la figura 10, da a lugar a sales solubles de calcio, tales como cloruro de calcio, acetato de calcio y bicarbonato de calcio que se eliminan por lixiviación. Las soluciones ácidas que contienen aniones se encuentran con frecuencia en entornos industriales (Mehta y Monteiro, 2006). Los compuestos de calcio solubles en agua luego son lixiviados por las soluciones acuosas (ACI, 2016).

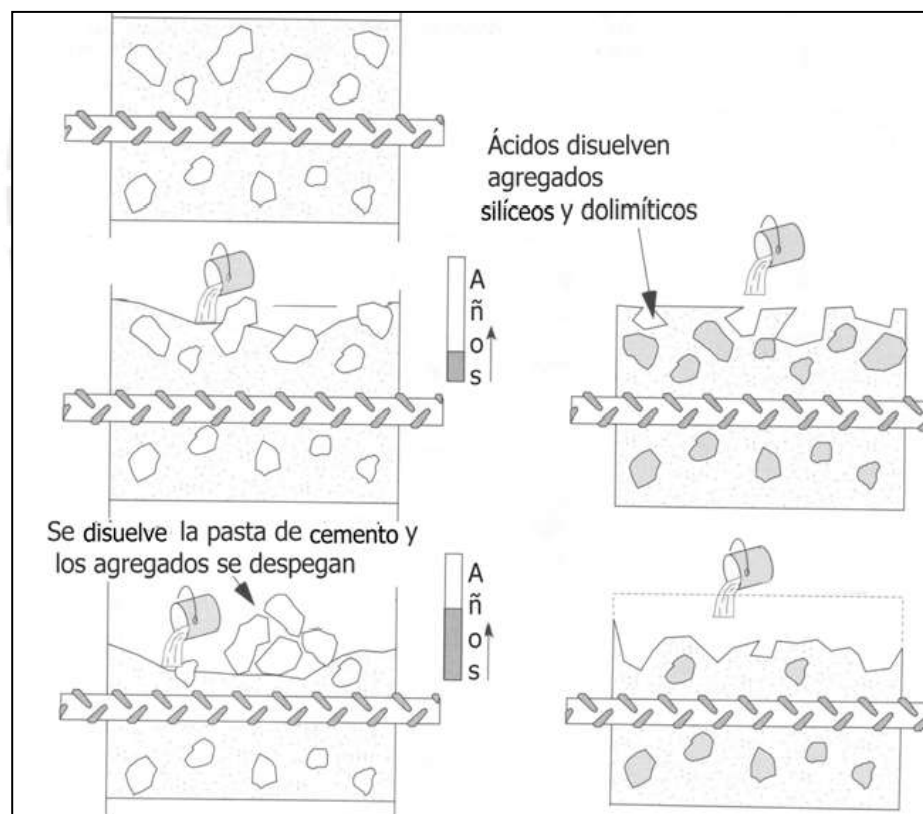


Figura 10: Deterioro del concreto expuesto a fluidos ácidos. Fuente: Avendaño, 2006.

Un estudio anterior reveló que la reacción entre el ácido sulfúrico y la pasta dan como resultado la conversión del hidróxido de calcio en sulfato de calcio, el cual puede convertirse en sulfoaluminato de calcio. Estas reacciones producen el incremento del

volumen del sólido. La formación de sulfato de calcio provoca disminución de la densidad del hormigón. Por tanto, como el peso depende del volumen y la densidad, la ganancia de peso inicial de las muestras de prueba probablemente se deba a que el aumento relativo del volumen sea mayor que la disminución relativa de la densidad (Attigbe y Rizkalla, 1988).

Entre los ácidos comunes más perjudiciales para el concreto se encuentran los indicados en la tabla 10.

Tabla 10: Principales ácidos que afectan el concreto. Fuente: Avendaño, 2006.

ÁCIDOS	
INORGÁNICOS	ORGÁNICOS
Clorhídrico	Acético
Brómico	Fórmico
Carbónico	Láctico
Ácido de cromo	Cítrico
Fluorhídrico	Tánico
Fosfórico	Butílico
Nítrico	Úrico
Sulfúrico	Húmico
Sulfuroso	Fenol

Los productos de la combustión de muchos combustibles contienen gases sulfurosos que se combinan con la humedad para formar ácido sulfúrico. Además, las aguas residuales se pueden recoger bajo condiciones que conducen a la formación de ácido. El drenaje de agua de algunas minas y algunas aguas industriales puede contener o formar ácidos que atacan el concreto.

Si los ácidos, cloruros u otras soluciones agresivas o salinas pueden alcanzar el acero de refuerzo a través de grietas o poros en el concreto, la corrosión del acero puede causar, a su vez, agrietamiento y desprendimiento del concreto (ACI, 2016).

b) Aguas puras

Generalmente provienen de montañas y son consideradas como un agente de deterioro. Por ejemplo, en los países escandinavos las presas de agua fueron destruidas por este proceso (Mehta y Monteiro, 2006).

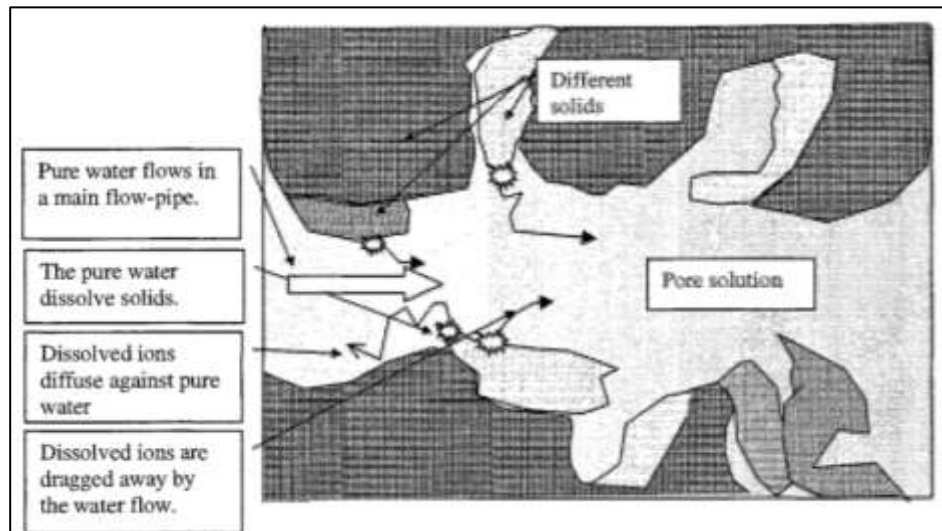


Figura 12: Principio de cómo el agua pura en el sistema de poros disuelve las sustancias de las paredes.
Fuente: Ekström, 2001.

Las aguas puras tienen una fuerza iónica muy reducida (concentración baja de iones), las cuales, al estar en contacto con el concreto, buscan llegar al equilibrio de disolución de los diferentes compuestos sólidos de la pasta de cemento. Esto genera la rápida disolución de la portlandita y otros compuestos de la pasta. A este fenómeno se lo conoce como ‘lixiviación por aguas puras’, pues produce el arrastre o lavado de la fase acuosa del concreto, dejando libres a los agregados. Además, produce la aparición de eflorescencias (ver figura 12) y la disgregación del concreto (Sanjuan y Castro, 2001).



Figura 11: Eflorescencia en el concreto. Fuente: Rojas, 2016.

Adicionalmente, el CO_2 libre en aguas blandas y estancadas reducen el pH por debajo de 6, lo cual es perjudicial para el concreto (Mehta y Monteiro, 2006) pues aumenta la solubilidad del hidróxido de calcio, carbono de calcio y los hidratos de calcio mediante

la formación de bicarbonatos de calcio (Hilsdorf, y Kropp, 2014).

La mayoría de las aguas naturales no atacan la pasta de cemento, pues la solubilidad de los productos de hidratación formadores de matriz del cemento es baja. Sin embargo, debido a la baja concentración de iones disueltos del agua pura, la disolución de los productos de hidratación es favorecida. Estos pueden ser llevados fuera de la matriz por difusión o ser retirados de la superficie de reacción por un flujo convectivo. El cemento portland hidratado contiene hasta 25 % a 30 % de Ca(OH)_2 , el cual es soluble en agua. Este fenómeno normalmente afecta la superficie del concreto, pero puede influenciar en las secciones interiores debido a una permeabilidad al agua muy alta, pues el agua blanda penetrará fácilmente. Aunque la permeabilidad al agua del hormigón es un parámetro importante que controla el ataque, la concentración de compuestos solubles y la solubilidad de los elementos de la pasta son parámetros adicionales de igual importancia (Hilsdorf, y Kropp, 2014).

2.4 Morfología del concreto

2.4.1 Cambios macroscópicos

La inspección visual es una evaluación del concreto para identificar y definir diversas características que el material puede exhibir durante su vida útil. Además, este análisis permite obtener información histórica importante sobre el rendimiento y la durabilidad del mismo y ayuda a la detección temprana de los esfuerzos o niveles de deterioro, lo que permite la reparación o la rehabilitación de la estructura antes de ser necesario su reemplazo (ACI, 2016). Este procedimiento se limita típicamente a las superficies de la estructura de concreto que son visualmente accesibles y se debe complementar con pruebas. La Guía de Inspección Visual del ACI del 2016, resume algunos puntos a tener en cuenta:

A) Indicadores de la condición actual de la estructura:

Los indicadores son mostrados en la tabla 11:

Tabla 11: Factores indicadores de la condición actual de la estructura. Fuente: ACI, 2016.

CONDICIÓN ACTUAL DE LA ESTRUCTURA	Aparente alineación de la estructura	Asentamiento	
		Deflexión	
		Expansión	
		Contracción	
	Condición superficial del concreto	Estado general: Bueno, satisfactorio, pobre	
		Superficies formadas y terminadas	Huecos de aire en la superficie
			Rayas de arena
			Áreas suaves
			Juntas frías
			Coloración
		Fisuración	Ubicación y frecuencias
			Mapa de fisuras
			Ancho y patrón
			Lixiviación
		Deslaminación	área, profundidad
			Tipo
		Manchas, eflorescencia	
		Refuerzo expuesto: corrosión	
		Curvado y deformado	
		Erosión	Abrasión
			Cavitación
		Parcheo o reparaciones anteriores	
		Revestimientos, sistemas de protección, recubrimientos.	Tipo y espesor
			Enlace al concreto
			Condición

B) Indicadores de la debilitación del concreto:

Los indicadores para describir la debilitación del concreto se resumen en la tabla 12:

Tabla 12: Indicadores de la debilitación del concreto. Fuente: ACI, 2016.

INDICADORES DE DESGASTE	Fisuración
	Coloración
	Sedimentos superficiales y exudación
	Derrames

2.4.2 A nivel microscópico

El progreso en el campo de los materiales es el resultado de reconocer que las propiedades de un material derivan de su microestructura. La caracterización completa de la microestructura de un sólido lleva consigo la determinación de los tipos, cantidades y distribución de todos los constituyentes presentes (Puertas et. Al, 1991).

Actualmente, no hay métodos disponibles para evaluar el desempeño de cementos hidráulicos en ambientes ricos en ácidos y sulfatos. La ASTM describe dos métodos de prueba realizar estas evaluaciones: ASTM C452-19 “Standard Test Method for Potential

Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate” y ASTM C1012-18 “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution”. Sin embargo, ambos han sido cuestionados porque no pueden predecir el desempeño en campo de manera adecuada. Entre los diversos problemas con respecto a estas pruebas, cabe resaltar que se llevan a cabo con morteros y no concreto y, además, solo tienen en cuenta la expansión debido a la formación de etringita (Girardi et. All, 2010).

El ataque ácido generalmente se desprecia, aunque causa pérdida de masa y puede acelerar el proceso de deterioro inducido por la exposición al sulfato. (Girardi, Vaona y R. Di Maggio, 2010).

Para analizar el comportamiento de la microestructura del concreto existen diversos métodos. A continuación, será descrito el ensayo SEM:

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) utiliza un haz enfocado de electrones de alta energía para generar una variedad de señales en la superficie de especímenes sólidos. Las señales que se derivan de las interacciones electrón-muestra revelan información sobre la muestra, la cual incluye morfología externa (textura), composición química, estructura cristalina y orientación de los materiales que componen la muestra (Swapp, 2017).

En la mayoría de las aplicaciones los datos se recopilan en un área seleccionada de la superficie de la muestra, y se genera una imagen bidimensional que muestra variaciones espaciales en estas propiedades. Las áreas, que van desde aproximadamente 1 cm a 5 micras de ancho, pueden formar imágenes en un modo de escaneo utilizando técnicas convencionales de SEM (ampliación que varía desde 20X hasta aproximadamente 30,000X, resolución espacial de 50 a 100 nm) (Swapp, 2017).

El SEM también es capaz de realizar análisis de ubicaciones de puntos seleccionados en la muestra; este enfoque es especialmente útil en composiciones químicas que determinan cualitativa o semicuantitativamente (usando espectroscopía de rayos X de energía dispersiva EDS), estructura cristalina y orientaciones de cristal (usando difracción de retrodispersión de electrones EBSD) (Swapp, 2017).

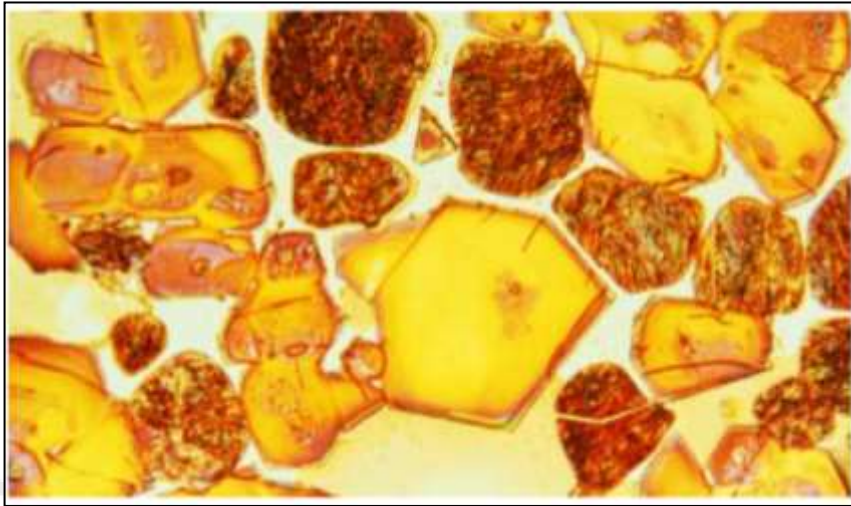


Figura 13: El examen de secciones finas pulidas de clínter portland muestra la alita (C3S) como cristales angulares y claros. Los cristales más oscuros y arredondados son de belita (C2S). Fuente: PCA, 2004.

En la figura 13 de la microestructura del clínter del cemento muestra, por un lado, la alita bajo la forma de cristales biaxiales, incoloros y con contornos poligonales. Por otro lado, se presenta la belita bajo el aspecto de granos redondeados sin forma cristalina bien definida, color castaño y muestra colores de interferencia. Presenta estrías con frecuencia que forman un ángulo de aproximadamente 60° (PCA, 2004).

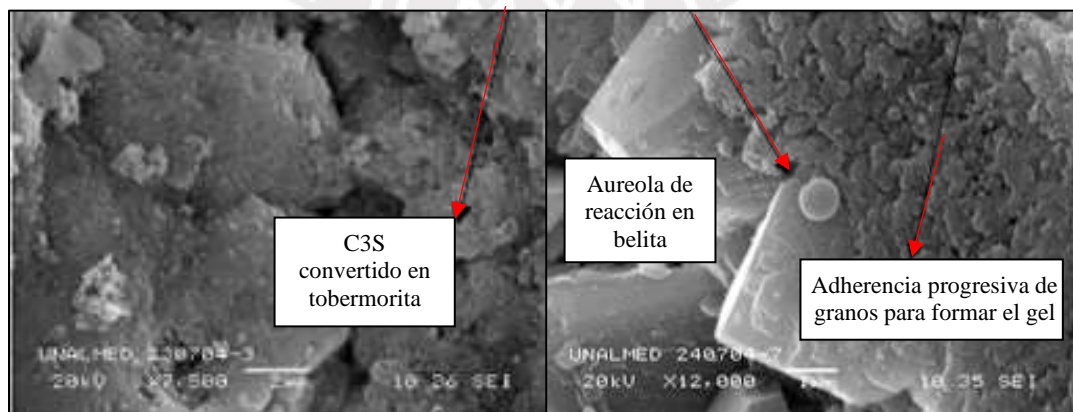


Figura 14: Imágenes SEM (10000 X y 12000X). Alita y belita en proceso de hidratación. Fuente: Giraldo et. al, 2006

En la figura 14 se observa la forma que va tomando la pasta al hidratarse, donde va alcanzando uniformidad (formación de tobermorita). Además, también se observa la microestructura de las fases en proceso de hidratación.

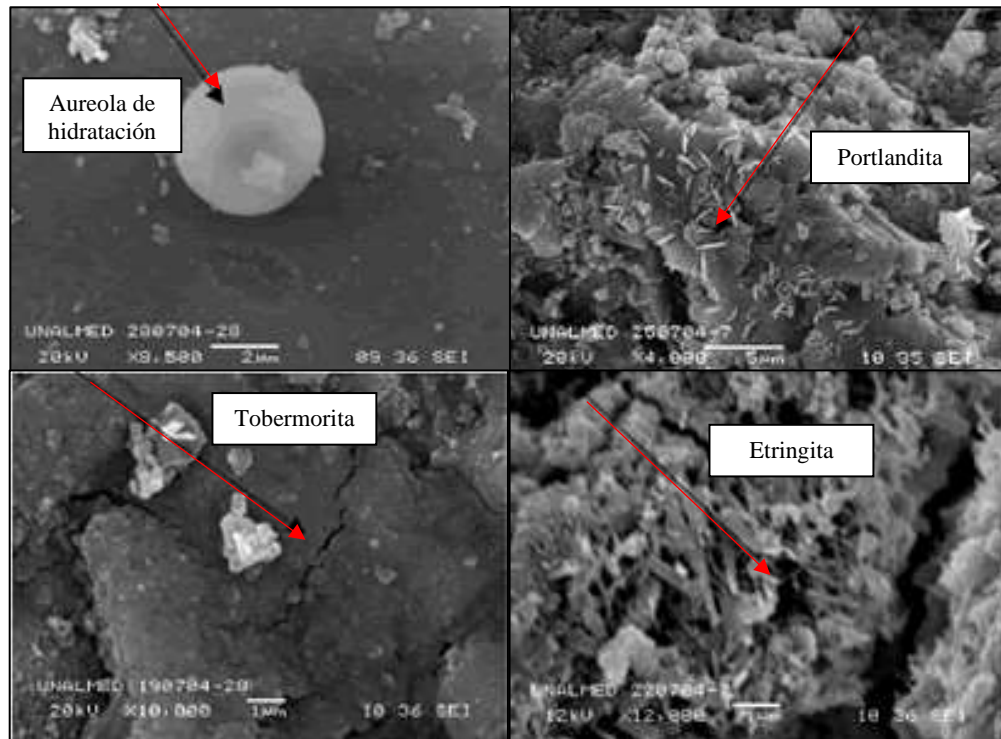


Figura 15: Imágenes SEM (10000 X y 12000X) Fases hidratadas del cemento. Fuente: Giraldo et. al, 2006.

La portlandita se aprecia con claridad, sus bordes bien definidos y la forma hexagonal que la caracteriza. La etringita se presenta bien cristalizada, en forma de agujas y de un tamaño inferior a 1 μm . La tobermorita conforma una matriz mucho más densa, compacta y continua que en las muestras a edades menores (Giraldo et. all, 2006).

3. MATERIALES

3.1 Cementos

La presente tesis se realizará con tres tipos de cemento:

Cemento tipo I

Es de uso general, apropiado para todos los usos convencionales en: pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tubería, productos de concreto prefabricado, etc. (PCA, 2004). Para UNACEM, aproximadamente el 85% de las ventas se debe a la comercialización del cemento tipo I (Chang et. Al., 2017). Por ello, debido

al alto consumo de este producto, será uno de los empleados para estudio.

Cemento tipo V

Es muy resistente a sulfatos debido al bajo contenido de C3A con aproximadamente menos del 5% (PCA, 2004). También genera de bajo calor de hidratación, por lo que su desarrollo de resistencia es más lento que en el tipo I. El uso de baja relación agua-materiales cementantes y baja permeabilidad son fundamentales para el buen desempeño de cualquier estructura expuesta a los sulfatos. El cemento tipo V, como otros cementos, no es resistente a ácidos y a otras sustancias altamente corrosivas (PCA, 2004).

Cemento tipo IP

Los cementos portland puzolánicos se designan como tipo IP, donde el contenido de puzolana está entre 15% y 40% de la masa del cemento (PCA, 2004). Estudios revelan que, en cuanto a desarrollo de la resistencia a compresión del concreto, el cemento tipo I es muy acelerado respecto al cemento tipo IP pues, en algunos casos, el primero solo a los 7 días supera las condiciones de la resistencia requerida. Por tanto, cementos con puzolana muestran un desarrollo de resistencia más letárgica (Cuellar y Sequeiros, 2017). Este tipo de cementos se emplea para la construcción en general y concretos expuestos a condiciones severas, tales como sulfatos y también cuando agregados potencialmente reactivos se van a emplear. Otros usos comunes son la elaboración de concretos expuestos al agua del mar y concretos prefabricados sometidos a curado térmico.

La tabla 13 muestra los pesos específicos según el tipo de cemento, lo cual muestra que el mayor valor corresponde al cemento tipo V y el menor al cemento tipo IP:

Tabla 13: Resumen de las propiedades del cemento. Fuente: propia.

CEMENTO	PESO ESPECÍFICO (Kg/cm³)
Tipo I	3.14
Tipo V	3.18
Tipo IP	3.03

3.2 Agregado grueso y fino

El agregado grueso empleado será según el Huso 57. Según la norma NTP 400.037:2018 “Agregados para concreto. Requisitos”, el TM corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido entre 5 % y 10 % (INACAL, 2018); es decir, en este caso TM 3/4”. Para validarlos y determinar sus propiedades para el diseño, se realizaron ensayos según las Normas Técnicas Peruanas. Por otro lado, se empleó arena gruesa y los ensayos siguieron el mismo procedimiento que el agregado grueso. Las normas que los definen son:

- NTP 400.012:2001 “Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global”
- NTP 400.017:2011 “Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado”
- NTP 400.022:2013 – “Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado fino”
- NTP 339.185:2013– “Método de ensayo normalizado para determinar el contenido de humedad total evaporable de agregados por secado”

Tabla 14: Resumen de las propiedades de los agregados. Fuente: propia.

RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDADES	FINO (Jicamarca)	GRUESO (Flor de Nieve)
P.U. suelto (Kg/m ³)	1494	1520
P.U. compactado (Kg/m ³)	1618	1665
P.e (kg/m ³)	2647	2734
M.F.	3.14	6.87
TMN (")	-	3/4"
% Wa	1.39	0.75
% Wo	9.02	0.47
% Pasante malla #200 (*)	6.29	0.31
Azul de metileno (*)	1.92	-

(*) Resultado proporcionado por UNICON, 2018.

Para tener un valor representativo, se realizaron de dos a tres repeticiones por ensayo

y se tomó el valor promedio de los resultados para definir las propiedades de los agregados a emplear. En cuanto al ensayo de humedad, se realizó al recibir los agregados en el laboratorio, como también cada día de moldeo de muestras. La tabla 14 muestra las propiedades de cada tipo de agregado.

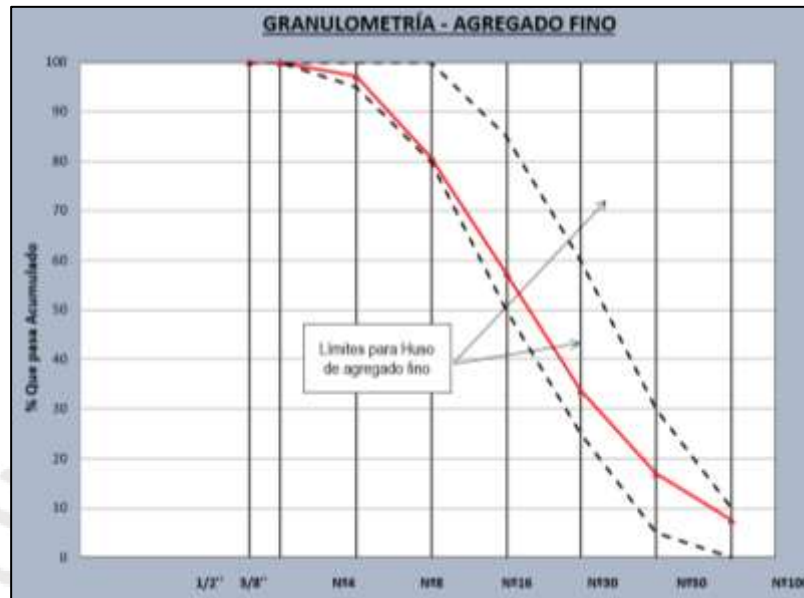


Gráfico 2: Granulometría del agregado fino. Fuente: propia.



Gráfico 1: Granulometría del agregado grueso. Fuente: propia.

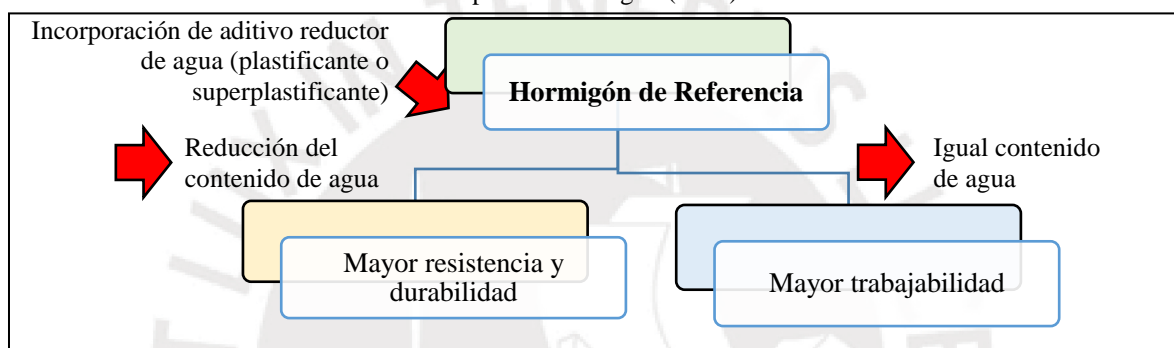
En el caso de la granulometría, se realizaron tres ensayos por agregado. El gráfico 1 presenta uno de los gráficos obtenidos de la arena gruesa, donde se puede apreciar que la granulometría del agregado (línea roja) está dentro del rango de la ASTM C33-16: “Especificación Normalizada para Agregados de Concreto” (líneas negras punteadas). Por

otro lado, en cuanto al agregado grueso, el gráfico 2 presenta uno de los resultados de granulometría, en el cual la granulometría del agregado grueso también cumple los requerimientos de la norma ASTM C33 para el Huso 57.

3.3 Aditivos

El aditivo a emplear será el reductor de agua de alto rango Master Rheobuild 1201, el cual cumple con la norma ASTM C494-18: “Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto”. Entre las propiedades que otorga este aditivo al concreto están:

Gráfico 3: Propiedades del aditivo reductor de agua. Adaptación del gráfico 5 del Manual de Tecnología para el Hormigón (2010)



Es decir, su uso permitirá reducir cierto contenido de agua y obtener la relación w/c requerida y, al mismo tiempo, que el concreto pueda alcanzar el slump necesario.

Además, tiene beneficios como desarrollo de resistencias tempranas y, al tener menor contenido de agua, la porosidad es menor; es decir, habrá menor penetración de agentes corrosivos (PCA, 2004). La dosificación empleada fue entre 7 a 10 mililitros por kilogramo de cemento. Esta varió según el tipo de cemento empleado y su grado de finura.

4. METODOLOGÍA

4.1 Diseño de mezclas según el método ACI

Los diseños de mezcla se realizaron con el método de la guía ACI 211.1-91: “Guía para el proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo”. Este tipo de metodología de diseño fue creado en el año 1944 y es muy empleado, especialmente cuando se tienen agregados normados, en este caso, según la norma ASTM C33.

El método es empleado para mezclas con resistencia a compresión entre 150 y 450 kg/cm² y peso unitario entre 2300 a 2450 kg/cm³. Por ello, debido a que los agregados eran normados, la resistencia a compresión y el peso unitario estaban dentro del rango propuesto por el ACI, se empleó este método. Para realizar el diseño es importante conocer los datos de los agregados mostrados en la tabla 15:

Tabla 15: Requisitos para el diseño de mezcla. Fuente: ACI, 1991.

Propiedades de los materiales	Propiedades del concreto
Granulometría (TM y MF) de los agregados	Slump requerido
Peso unitario suelto y compactado y peso específico de los agregados	Resistencia a la compresión o relación w/c
Humedad natural y de absorción de los agregados	*Contenido de aire
Peso específico del cemento	*Contenido mínimo de cemento

(*) En caso de ser necesario

Los diseños obtenidos en peso seco para 1m³ fueron los siguientes:

Tabla 16: Pesos secos por m³ para cada diseño de mezcla. Fuente: propia.

PROPORCIONAMIENTO			
MATERIAL	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
	Cemento tipo I	Cemento tipo V	Cemento tipo IP
Agua (L)	206	206	206
Cemento (Kg)	412	412	412
Grava (Kg)	982	982	982
Arena (Kg)	751	755	738
Aditivo (L)	3.1	3.1	4.5

Por otro lado, los costos por diseño estimados son los siguientes:

Tabla 17: Costos de cada diseño por m³. Fuente: propia.

ANÁLISIS DE COSTOS POR DISEÑO									
MATERIAL	Diseño 1			Diseño 2			Diseño 3		
	Cemento tipo I	P.U (S/.)	Parcial (S/.)	Cemento tipo V	P.U (S/.)	Parcial (S/.)	Cemento tipo IP	P.U (S/.)	Parcial (S/.)
Agua (L)	206	0.01	1.65	206	0.01	1.65	206	0.01	1.65
Cemento (Kg)	412	0.41	168.19	412	0.482	198.44	412	0.466	192.04
Grava (m ³)	0.359	36.12	12.97	0.359	36.12	12.97	0.359	36.12	12.97
Arena (m ³)	0.284	48.30	13.72	0.284	48.3	13.72	0.279	48.3	13.48
Aditivo (L)	3.1	5.67	17.58	3.1	5.67	17.58	4.5	5.67	25.52
	Total tipo I (S/.)		214.1	Total tipo V (S/.)		244.3	Total tipo IP (S/.)		245.6

Dichos precios se pueden tomar en cuenta al realizar el análisis costo-beneficio según los resultados de la presente tesis. En la tabla se puede observar la diferencia en costos y la influencia del consumo de aditivo. El diseño con cemento IP, al tener mayor superficie específica, requiere mayor dosis de aditivo, por lo cual el precio por m³ se incrementa.

4.2 Ensayos de control de calidad del concreto

Para evaluar las mezclas de concreto, se realizaron los siguientes ensayos de control según las normas indicadas en la tabla 18.

Tabla 18: Resumen de ensayos de control de calidad del concreto. Fuente: propia.

ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO	
ENSAYO	NORMA
Toma de muestras	NTP 339.036:2017 y ASTM C172-17
Temperatura del concreto (°C)	NTP 339.184:2018 y ASTM C1064-17
Medición del slump (pulg.)	NTP 339.035:2015 y ASTM C143-15
Peso unitario y contenido de aire	NTP 339.046:2019 y ASTM C138-17
Ensayo de resistencia a compresión	NTP 339.033:2015 y ASTM C39-18

4.3 Procedimiento de trabajo

El procedimiento se resume en el gráfico 4.

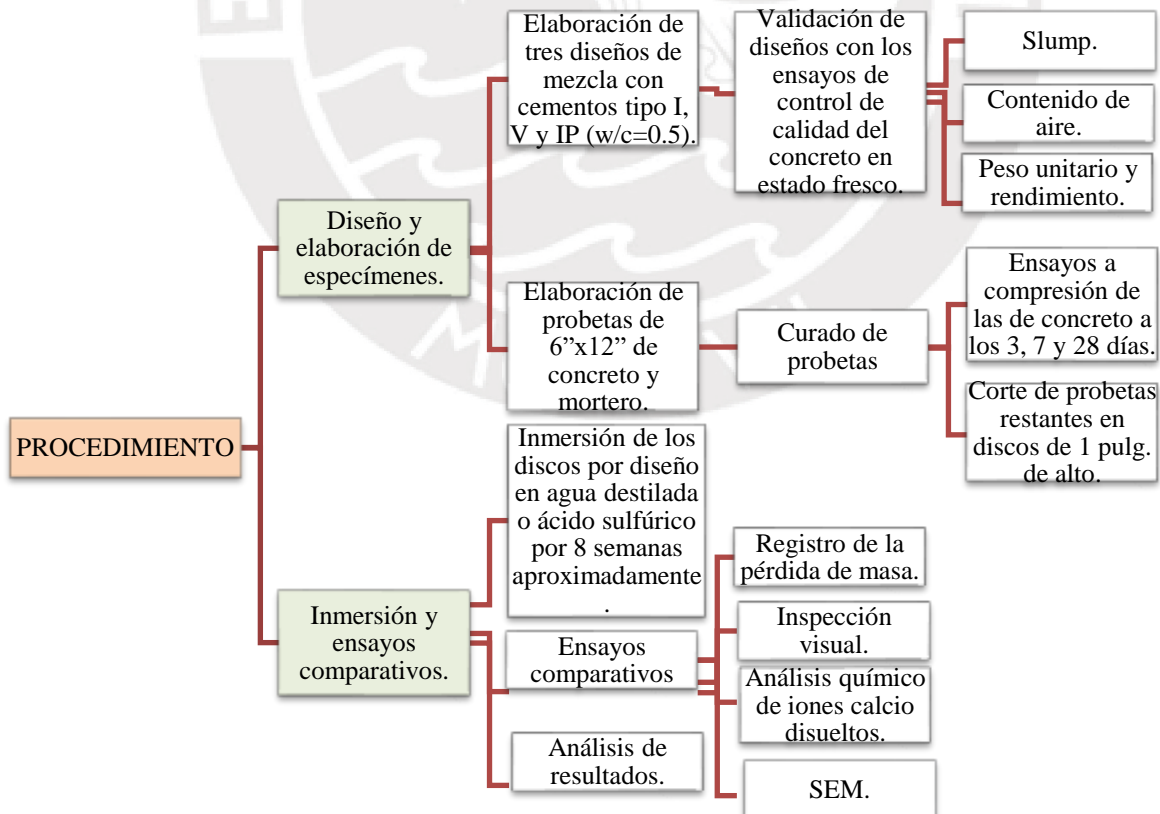


Gráfico 4: Esquema del procedimiento operativo. Fuente: propia.

4.4 Descripción de los sistemas de estudio y de las condiciones de exposición

La resistencia química de las muestras de tres tipos de concreto fue investigada a temperatura ambiente frente a los siguientes medios:

- (a) Inmersión continua en solución de ácido sulfúrico con una concentración de 10 g/L para una condición acelerada; la solución fue renovada en cada recipiente cada dos semanas.

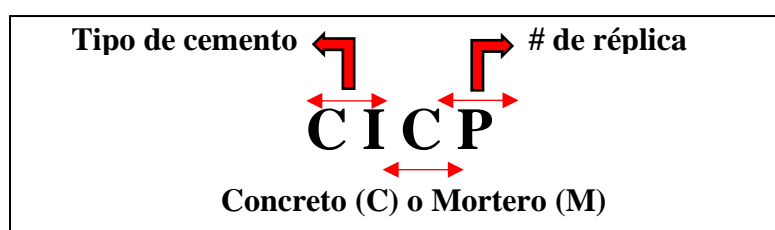
Este primer tipo de ensayo tiene la finalidad de simular las condiciones a las que accidentalmente pueden quedar expuestas estructuras de concreto sometidas a ácidos, como en pozas de lixiviación de minerales.

- (b) Inmersión continua en agua destilada. El agua fue renovada en cada recipiente cada dos semanas.

En este segundo tipo de ensayo se simula la situación de estructuras de concreto simple expuestas a aguas puras, por ejemplo, aguas de lluvias.

Ambos ensayos son analizados en condiciones estáticas (sin agitación del medio, ni flujo del medio), debido a restricciones propias de ensayos en laboratorio. Además, se realizó el control del pH del medio de ensayo en cada recipiente semanalmente, el cual puede variar debido a reacciones químicas que pueden tener lugar durante el proceso de exposición.

Para cada diseño se tamizó la mezcla con un tamiz de 4" para obtener muestras de mortero y poder utilizar dichas muestras en análisis mediante SEM o difracción de rayos X. Los discos obtenidos para los 3 diseños de mezcla fueron sumergidos en los dos medios de ataque químico antes descritos. Para identificar cada espécimen (disco) según el diseño, la tabla 19 indica la codificación utilizada.



donde:

CI: Cemento tipo I

P : Disco patrón

CV: Cemento tipo V

1,2,3,4: Réplicas mortero

CIP: Cemento tipo IP

Tabla 19: Codificación de mezclas según diseño. Fuente: propia.

Tiempo de exposición (semanas)	DISEÑO 1: Cemento tipo I		DISEÑO 2: Cemento tipo V		DISEÑO 3: Cemento tipo IP	
	CONCRETO	MORTERO	CONCRETO	MORTERO	CONCRETO	MORTERO
0	CICP	CIMP	CVCP	CVMP	CIPCP	CIPMP
4	CIC1	CIM1	CVC1	CVM1	CIPC1	CIPM1
	CIC2	CIM2	CVC2	CVM2	CIPC2	CIPM2
8	CIC3	CIM3	CVC3	CVM3	CIPC3	CIPM3
	CIC4	CIM4	CVC4	CVM4	CIPC4	CIPM4

La tabla 20 muestra la proporción de los materiales por peso seco de los diseños según el espécimen con su codificación respectiva:

Tabla 20: Proporción de mezcla según codificación en seco por m³. Fuente: propia.

PROPORCIONAMIENTO			
MATERIAL	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
	CIC*	CVC*	CIPC*
Agua (L)	206	206	206
Cemento (Kg)	412	412	412
Grava (Kg)	982	982	982
Arena (Kg)	751	755	738
Aditivo (L)	3.1	3.1	4.5

* El diseño para las muestras CIM, CVM y CIPM eran los mismos que para concreto, pero pasados por el tamiz #4.

Protocolo para los ensayos de inmersión y extracción de muestras:

Este protocolo permite uniformizar el proceso de inmersión y de extracción de muestras, de tal manera que todas hayan sido sometidas a similares condiciones. A continuación, el gráfico 5 resume el protocolo anteriormente mencionado:

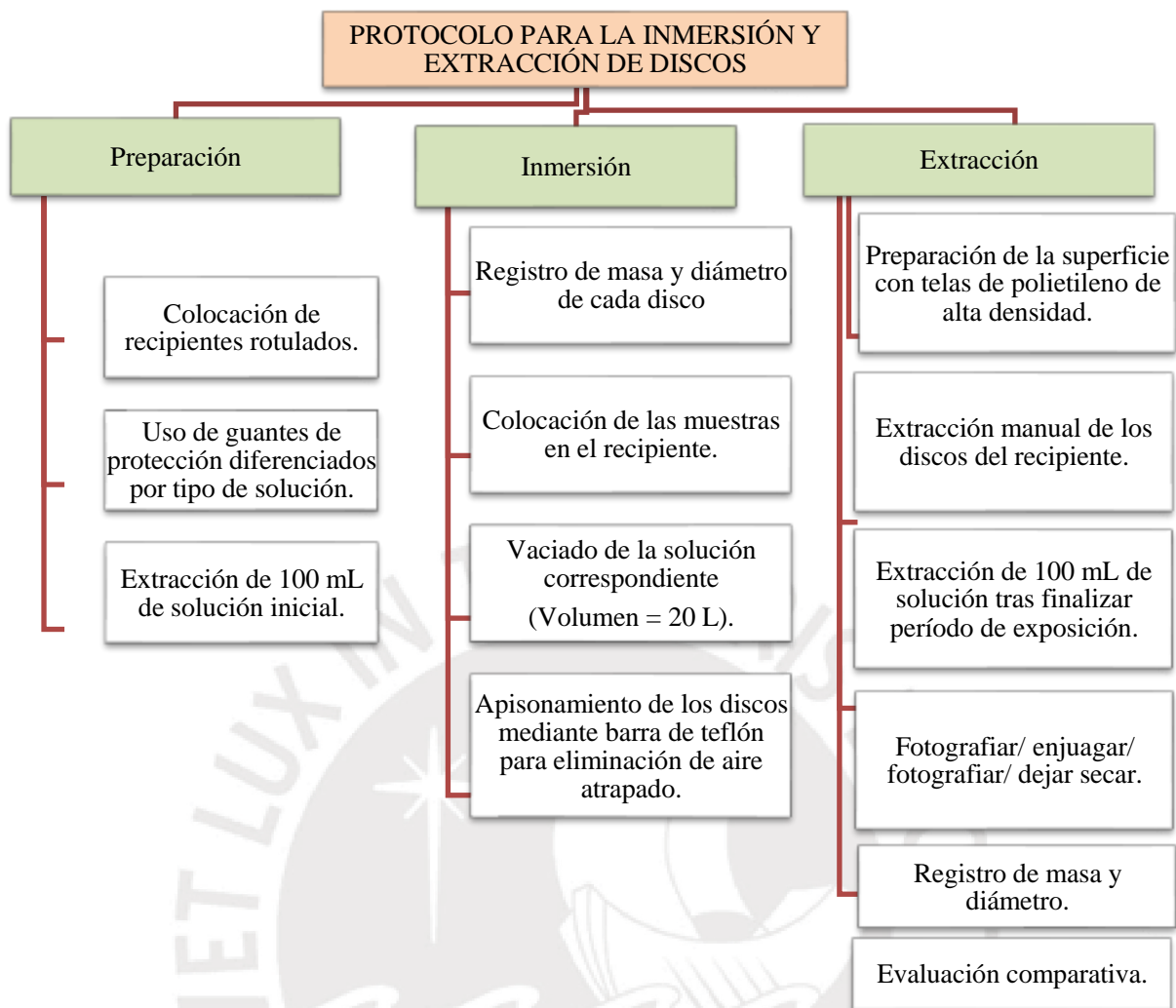


Gráfico 5: Resumen del protocolo de inmersión. Fuente: propia.

4.5 Ensayos y determinaciones

4.5.1 Pérdida de masa

Cada dos semanas, con el cambio de solución programada, se midieron la longitud y la masa de cada muestra, después de dejar secar las muestras. Los equipos/instrumentos empleados fueron una balanza con precisión de 0.01 g y un pie de rey. Las mediciones realizadas permiten determinar la pérdida de masa.

4.5.2 Análisis químico para determinación de iones calcio disueltos

Es conocido que una forma de manifestación del ataque químico sobre concreto es la lixiviación de la pasta de cemento. Esto implica que iones calcio, procedentes del concreto (y mortero), se disolverán en el respectivo medio de estudio.

Para estimar pérdida de calcio de las probetas, estas fueron analizadas por muestras de cada tipo de medio (solución de ácido sulfúrico y agua destilada) antes de, y después de un período de ensayo.

El método de análisis es llamado ‘Espectrometría de Masas de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS)’. En esta técnica, la muestra es quemada en un plasma de argón, y la identificación y la cuantificación de la cantidad de calcio existente en una muestra es obtenida mediante la comparación con el espectro de masas y la concentración de soluciones estándar de concentraciones conocida (curva de calibración).

Con los valores obtenidos se realiza el comparativo entre las sales de calcio disueltas a partir de las probetas de cada diseño.

4.5.3 Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para estimar el grado de ataque entre diseños, con una vista del comportamiento de los minerales anhidros del cemento, se realizó el ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Esta prueba se realizó antes de la inmersión y pasada la misma al tiempo de 8 semanas de las probetas de mortero para cada tipo de medio de estudio.

Debido a la dimensión máxima requerida, cada probeta fue dividida en cuatro partes para analizar solo una de ellas. Esta fue ingresada al equipo donde se recopilaron los datos de un área seleccionada de la superficie de la muestra, así como algunos puntos de la misma. Luego, se generó una imagen bidimensional por cada diseño, que mostraba al espécimen en diferentes escalas, y se realizaba la comparación entre los mismos.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Ensayos de concreto fresco

Los resultados obtenidos fueron también indicadores para determinar el diseño oficial de las mezclas. Se resumen en la tabla 21.

Tabla 21: Resumen de ensayos para concreto fresco. Fuente: propia.

ENSAYOS	TEMPERATURA		SLUMP		CONT. DE AIRE	PESO UNITARIO / RENDIMIENTO		
MEZCLA	T _{CONCRETO} (°)	T _{AMBIENTE} (°)	Slump (")	Tipo de falla	Aire atrapado (%)	P.U. Real	P.U. Teórico	Rendimiento
Cemento tipo I	20.8	19.1	6 1/2	normal	1.3	2424	2457	1.01
Cemento tipo V	17.9	18.9	6 1/2	normal	1.2	2462	2411	0.98
Cemento Tipo IP	19.4	18.8	6 1/2	normal	0.9	2470	2465	1.00

En la tabla se observa que el slump fue 6 ½” para los 3 casos. Por otro lado, el contenido de aire osciló entre 0.9 y 1.3; por ello, debido a que son valores dentro del rango sugerido por el ACI, no se realizaron correcciones en el diseño respecto a este valor. La figura 16 muestra los ensayos de slump y contenido de aire realizados para el diseño con cemento tipo V como referencia.



Figura 16: Determinación del asentamiento y contenido de aire para cada diseño. Fuente: propia.

5.2 Ensayos de concreto endurecido

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión del concreto en estado endurecido son mostrados en la tabla 22.

Tabla 22: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión. Fuente: propia.

PROBETA	EDAD (días)	DIÁMETRO (cm)		CARGA MÁX. (KN)	TIPO DE FALLA	ESFUERZO (Kg/cm2)	PROMEDIO (Kg/cm2)
		D1	D2				
DISEÑO 1: CEMENTO TIPO I							
D1-CI-3 (1)	2	15.27	15.32	323.4	2	179	185
D1-CI-3 (2)	2	15.35	15.29	345.2	3	191	
D1-CI-7 (1)	7	15.32	15.31	584.1	2	323	318
D1-CI-7 (2)	7	15.29	15.34	564.8	2	313	
D1-CI-28 (1)	28	15.34	15.27	714.5	2	396	409
D1-CI-28 (2)	28	15.22	15.25	754.9	5	422	
DISEÑO 2: CEMENTO TIPO V							
D2-CV-3 (1)	2	15.41	15.47	394.6	1	215	221
D2-CV-3 (2)	2	15.32	15.41	412.5	2	227	
D2-CV-7 (1)	7	15.28	15.3	573.1	2	318	314
D2-CV-7 (2)	7	15.28	15.28	556.8	1	310	
D2-CV-28 (1)	28	15.2	15.23	804.3	2	451	442
D2-CV-28 (2)	28	15.21	15.24	774.5	3	434	
DISEÑO 3: CEMENTO TIPO IP							
D3-CIP-3 (1)	2	15.27	15.32	433.8	2	241	231
D3-CIP-3 (2)	2	15.35	15.29	398.2	3	220	
D3-CIP-7 (1)	7	15.21	15.34	520.4	3	290	289
D3-CIP-7 (2)	7	15.34	15.29	519.7	2	288	
D3-CIP-28 (1)	28	15.2	15.23	657.1	3	369	378
D3-CIP-28 (2)	28	15.25	15.19	691.6	2	388	

5.3 Resultados de inspección visual de los especímenes

Para evaluar comparativamente los cambios producidos durante los ensayos fueron reservados discos sin ensayar (discos patrón) para ser empleados como referencia. Las apariencias iniciales se muestran en la figura 17. Los discos presentan un color gris, tanto para concreto como para mortero, para los tres diseños. Es notoria la diferencia entre los discos de mortero y concreto pues la grava se aprecia en la superficie de los tres primeros discos. Las muestras se observan íntegras, lo cual se tomará como referencia de su estado inicial.

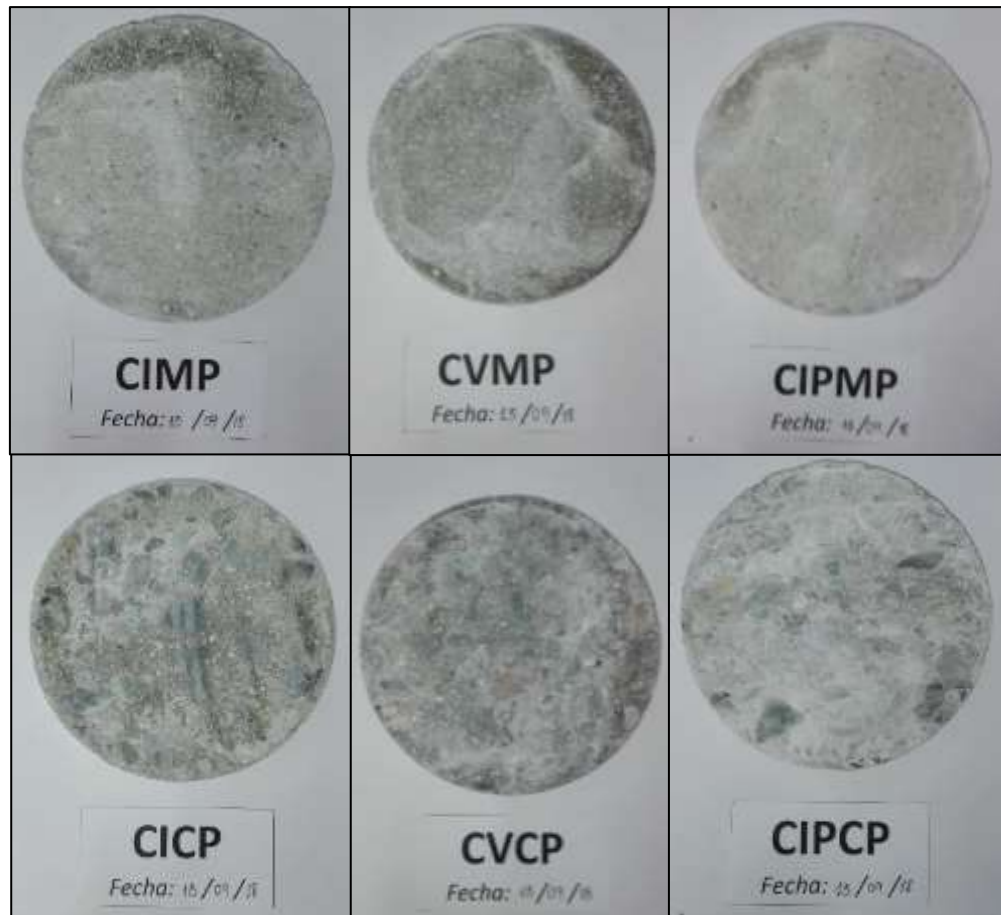


Figura 17: Especímenes ‘patrón’ de mortero y concreto de cada diseño. Fuente: propia.

Los especímenes ensayados fueron observados periódicamente durante su tiempo de exposición, donde se pudo apreciar los cambios de la superficie de las muestras, así como el estado de la solución en la que fueron sumergidos. La solución se reemplazó cada 15 días, lo cual permitió observar los discos fuera del fluido y analizar mejor sus variaciones.



Figura 18: Registro fotográfico mediante estereoscopio. Fuente: propia.

Por otro lado, se registraron fotografías con magnificación de los discos de mortero (en el caso de las probetas de concreto las gravas ocupaban toda el área de enfoque) mediante un equipo llamado estereoscopio, tal como se muestra en la figura 18.



Figura 19: Disco de mortero con cemento tipo I (izquierda). Burbuja de aire (derecha) (4x). Fuente: propia.

Como ejemplo ilustrativo de examinación con el estereoscopio la figura 19 muestra la apariencia de un disco CIM y el detalle de una burbuja de aire. La coloración es entre gris y crema y no se aprecia las partículas de arena. La burbuja muestra solo las partículas del mortero. No se observa la presencia de minerales.

En el caso del disco CVM, también se observa una superficie uniforme sin las partículas de agregado y la coloración similar a la muestra CIM (ver figura 20).



Figura 20: Disco de cemento tipo V (4x). Fuente: propia.

En el caso de un disco CIPM, las partículas de arena se observan ligeramente mejor. La burbuja de aire muestra algunas partículas producto del mortero (ver figura 21).



Figura 21: Disco con cemento tipo IP (izquierda) (4x). Burbuja de aire en el disco (derecha).

a) Medio de ensayo: Agua destilada

Los cambios cualitativos observados fueron similares para los 3 diseños y se resumen en la tabla 23.

Tabla 23: Cambios cualitativos en el tiempo de muestras de estudio (los 3 diseños de mezcla) y en el medio de ensayo (agua destilada). Fuente: propia.

CONDICIÓN ACTUAL DE LA MUESTRA EN AGUA DESTILADA			TIEMPO			
			Semana 2	Semana 4	Semana 6	Semana 8
MEDIO DE ENSAYO	Coloración blanquecina *		+++	++	+	+
	Contenido de partículas *		+++	++	+	+
CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL CONCRETO	Estado general	Satisfactorio ⁽¹⁾	x	x		
		Aceptable ⁽²⁾	-	-	x	x
		Insatisfactorio ⁽³⁾	-	-		
	Superficies formadas y terminadas	Huecos de aire en la superficie	+	+	-	-
		Exposición superficial de los agregados	ligeramente observables	observables	observables	observables
		Coloración	gris/áreas blanquecinas	gris/gris claro	gris/gris claro	gris
	Lixiviación *		+	+	+	+
	Textura	Cara expuesta	-	viscosa	-	viscosa
		Cara no expuesta	-	áspera	-	áspera
	Inspección En Estereoscopio (4X)	Visualización de minerales *	-	+	-	++
		Visualización de agregados *	-	+	-	++

(-): no se registró variación/no aplica

(*): + poco, ++ regular, +++ bastante

⁽¹⁾Satisfactorio: sin cambios notorios visuales.

⁽²⁾Aceptable: ligera a simple vista (ligera disminución de color, aumento ligero del diámetro de burbujas, etc.)

⁽³⁾Insatisfactorio: cambios notorios que afectan el desempeño de la muestra (desmoronamiento, fisuraciones, otros).

En cada cambio de agua destilada se observó que el medio siempre tendía a adaptar una coloración blanquecina a causa de los productos de lixiviación que desprendieron de las muestras, los cuales también se observaban en la solución tal como se muestra en la figura 22. Estos cambios fueron más notorios durante las primeras semanas, así como para las muestras de mortero respecto a las de concreto.



Figura 23: Variación en el tiempo de la apariencia del medio de ensayo. Fuente: propia.

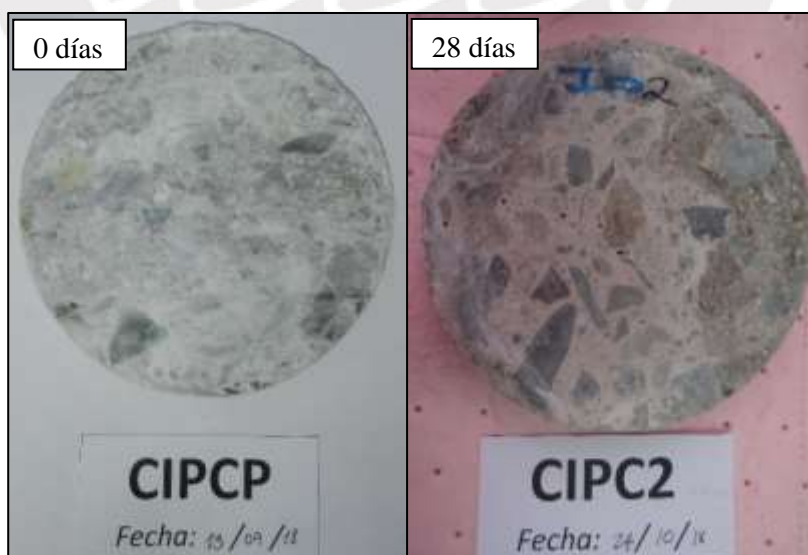


Figura 22: Variación del aspecto de la muestra CIP2. Fuente: propia.

Por otro lado, a simple vista algunas burbujas de aire aumentaron su tamaño ligeramente y, conforme avanzaba el tiempo, los discos se tornaron grises y mostraban

claramente sus agregados (ver figura 23). La superficie con una magnificación de 40 aumentos que muestra la figura 24 evidencia la presencia de sales y los agregados con cierto relieve respecto al estado inicial de la figura.



Figura 24: Agregado en relieve en disco con cemento tipo V a las 8 semanas de inmersión (izquierda). Brillo en los extremos del disco (derecha) (4x). Fuente: propia.

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10 g/L

Los cambios cualitativos observados fueron similares para los 3 diseños; sin embargo, se detallarán los principales cambios.

Tabla 24: Cambios visuales durante la primera semana

CONDICIÓN ACTUAL DE LA MUESTRA EN ÁCIDO SULFÚRICO 10 g/L			TIEMPO		
			Día 0	Día 4	Día 7
MEDIO DE ENSAYO	Coloración		incolora	incolora	incolora
	Incremento de temperatura		x	-	-
	Contenido de partículas *		+	+++	+++
	Burbujas en la solución		-	x	-
	Incremento de temperatura		x	-	-
CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL CONCRETO	Estado general	Satisfactorio	-	-	-
		Aceptable	x	x	x
		Insatisfactorio	-	-	-
	Superficies formadas y terminadas	Huecos de aire en la superficie	-	x	x
		Protuberancias	+	+	++
		Exposición superficial de los agregados	observables	observables	observables
		Coloración Cara expuesta	grisácea	grisácea	amarillenta
	Lixiviación *		-	+	++
	Textura	Cara expuesta	-	áspera	áspera

Al iniciar la inmersión, se observaron inmediatamente cambios. El medio de ensayo (solución de ácido sulfúrico), al entrar en contacto con los discos de concreto o mortero, dio lugar a reacciones que generaron efervescencia en la solución, cerca de los bordes de los discos. En los discos de mortero, a comparación con los de concreto, la efervescencia fue mayor.



Figura 25: Solución blanquecina (izquierda). Reacción de la solución con el disco (derecha).

La figura 25 muestra el tono blanquecino del agua y la reacción de la solución con las muestras que provocó la efervescencia mencionada en el párrafo anterior. Además, también se puede observar cómo el concreto se va degradando en los bordes.

Minutos después, la solución tuvo una apariencia incolora sin partículas en suspensión (sedimentación de los productos de reacción de color blanquecino). Por otro lado, los recipientes de polipropileno estaban empañados debido a que el medio había incrementado su temperatura. La alcalinidad del concreto (y del mortero) es debida a la presencia de hidróxido de calcio (una base fuerte) en los poros. La reacción entre un ácido fuerte (como el ácido sulfúrico) y una base fuerte es vigorosa y produce una sal (que en este caso sería sulfato de calcio) y agua. Además, es una reacción exotérmica (aumento de temperatura). De otro lado, el ataque del ácido sulfúrico sobre algunos de

los agregados (por ejemplo, carbonato de calcio) puede producir dióxido de carbono gas; esto puede explicar la efervescencia (burbujas) observadas (Gonzales, 1991).

Los cambios cualitativos observados quincenalmente son resumidos en la tabla 25.

Tabla 25: Cambios cualitativos en el tiempo de muestras de estudio (los 3 diseños de mezcla) y en el medio de ensayo (ácido sulfúrico 10 g/L) y muestras de estudio. Fuente: propia.

CONDICIÓN ACTUAL DE LA MUESTRA EN ÁCIDO SULFÚRICO 10 g/L			TIEMPO			
			Semana 2	Semana 4	Semana 6	Semana 8
MEDIO ENSAYO	Coloración		Incolora	Incolora	Incolora	incolora
	Contenido de partículas *		+++	+++	+++	+++
	Burbujas en la solución		x	-	-	-
CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL CONCRETO	Estado general	Satisfactorio	-	-	-	-
		Aceptable	x	-	-	-
		Insatisfactorio		x	x	x
	Superficies formadas y terminadas	Huecos de aire en la superficie	x	x	x	x
		Erupciones	++	+	-	-
		Exposición superficial de los agregados	observables	observables	observables, sueltos y en relieve	observables, sueltos y en relieve
		Coloración Cara expuesta	amarillenta	amarillenta	amarillenta	amarillenta
		Coloración Cara no expuesta	/rojiza/ blanquecina	/rojiza/ blanquecina	/rojiza/ blanquecina	/rojiza/ blanquecina
		Lixiviación *	+++	+++	+++	+++
	Textura	Cara expuesta	-	áspera	-	áspera
		Cara no expuesta	-	viscosa	-	eflorescencia
	Inspección En Estereoscopio (4X)	Delaminación en cara expuesta*	-	+	-	++
		Coloración rojiza en cara no expuesta	-	x	-	x
		Visualización de cristales en cara no expuesta*	-	+	-	++

(-): no se tienen datos/no aplica.

(*): + poco, ++ regular, +++ bastante

Tras 2 semanas de exposición, se desarrollaron algunas erupciones en las muestras y a su vez se tornaron de color amarillo. Además, se observó cierto relieve pasta-agregado en la superficie y algunas socavaciones, ello indica lixiviación de la pasta de cemento (ver figura 26).



Figura 26: Erupciones en el disco (izquierda). Relieve entre agregados y pasta (derecha).
Fuente: propia

Durante las 4 primeras semanas se observó mayor deterioro en los bordes y relieve pasta-agregado en la cara expuesta, mientras que en la no expuesta (en contacto con la base del recipiente) desarrolló una textura viscosa y coloración blanquecina. A las 8 semanas, la cara expuesta presentó una lixiviación superior que exponía a los agregados, mientras que la otra presentaba cavidades por crecimiento de poros ya existentes.

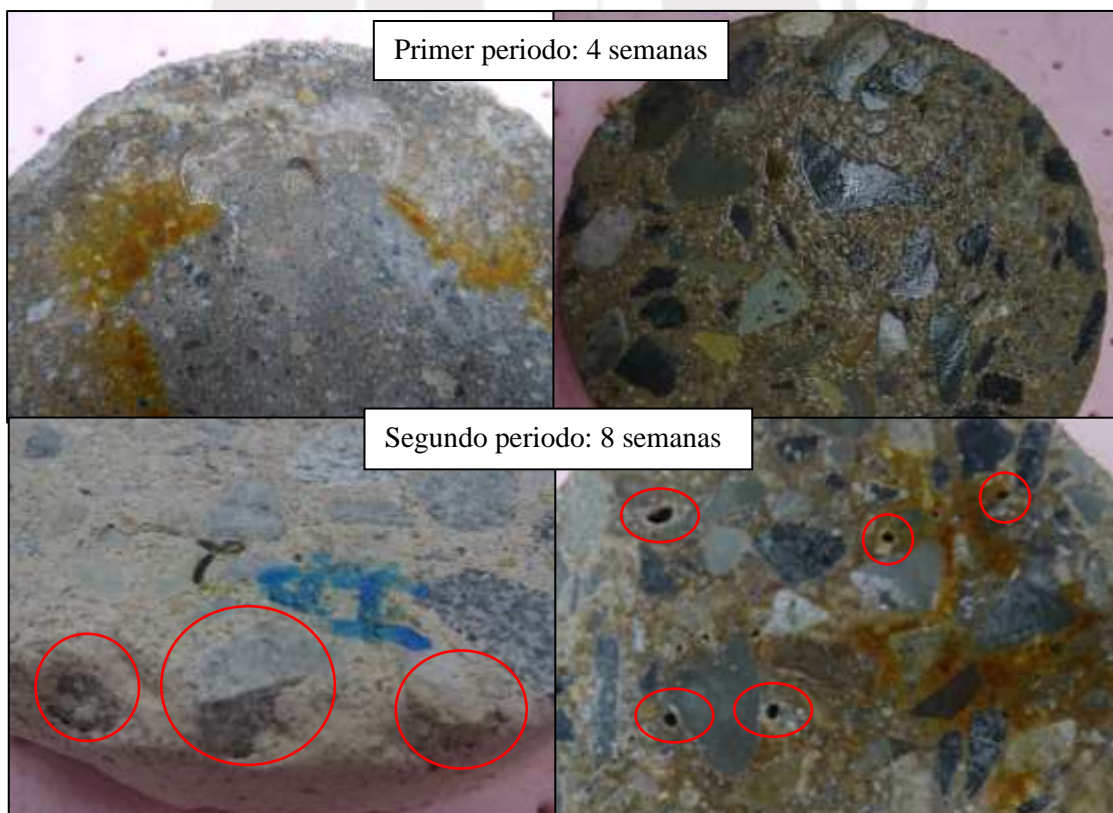


Figura 27: Cambios registrados en las muestras. Fuente: propia.

La figura 28 muestra la cantidad de cristales y eflorescencia en los dos tiempos de extracción:



Figura 28: Aumento de eflorescencia y disminución de la cantidad de cristales (4x). Fuente: propia.

Por otro lado, en el periodo inicial de 4 semanas solo se encontraron micro fisuras, pero a las 8 semanas el agregado quedó expuesto de manera notoria, tal como se observa en la figura 29.

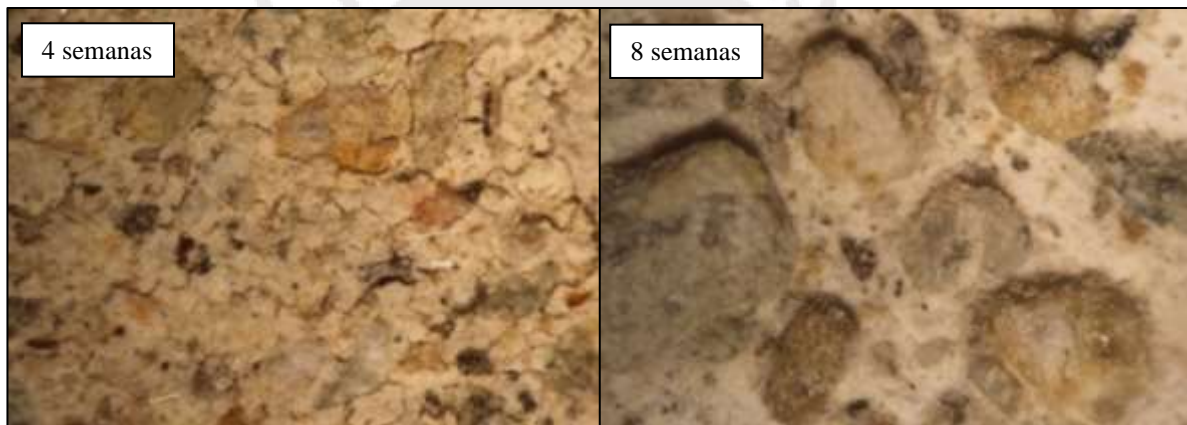


Figura 29: Cambio superficial en el tiempo debido a la lixiviación de la pasta (4x). Fuente: propia.

Finalmente, en el caso de la coloración rojiza, la figura 30 muestra que la intensidad se mantuvo, pero el área de alcance de dicha coloración disminuyó ligeramente pues algunos agregados podían observarse.

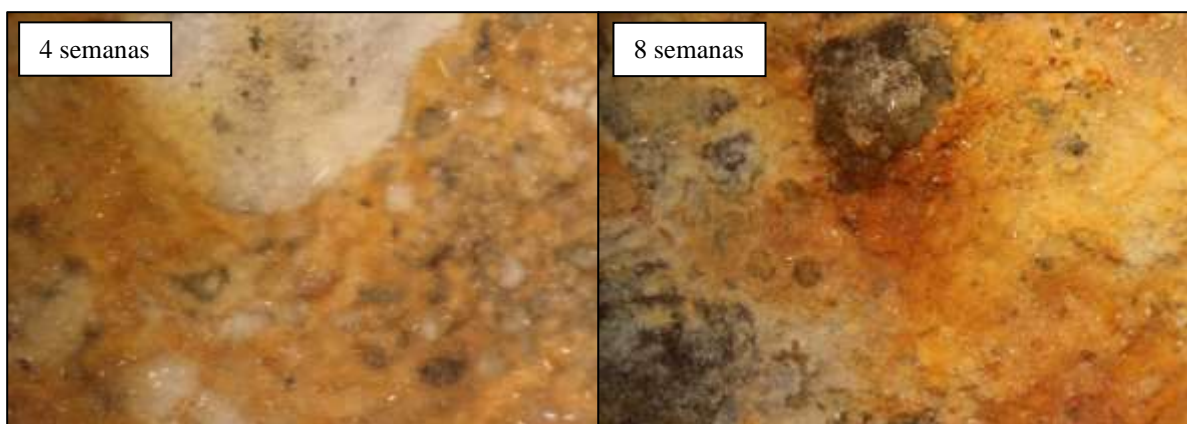


Figura 30: Coloración rojiza en el tiempo (4x). Fuente: propia.

5.4 Resultados de la determinación de pérdida de masa

Debido a las reacciones que se puedan generar entre las muestras y los medios de estudio, así como la posible degradación de aquellas, se registró la masa de cada disco para evaluar su cambio en el tiempo en ambos casos de estudio. Para comparar las masas, los especímenes debían estar secos, por lo que se fueron pesando hasta alcanzar un valor estable (indicador de que la muestra se encontraba seca). Una vez se obtenía la masa estable, ese dato era utilizado para la comparación respectiva. En cada ítem se detallará los resultados obtenidos de pérdida de masa por diseño.

a) Medio de ensayo: Agua destilada

En general los resultados de pérdida de masa para las muestras de mortero fueron mayores que para las de concreto para los tres casos. La tabla 26 muestra el resumen de los valores obtenidos por muestra que estuvo en contacto con agua destilada.

Tabla 26: Registro de masas en el tiempo para los discos inmersos en agua destilada según el tipo de cemento. Fuente: propia.

Pérdida de masa: agua destilada							
Características		Concreto			Mortero		
Tipo de cemento	Tiempo de exposición (semanas)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Δ Masa (%)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Δ Masa (%)
I	4	1006.00	988.17	1.77	942.70	908.56	3.62
	8	973.35	960.23	1.35	929.27	909.28	2.15
V	4	1037.92	1017.07	2.01	965.58	925.63	4.14
	8	995.01	981.67	1.34	951.41	924.59	2.82
IP	4	986.13	970.51	1.58	960.13	933.42	2.78
	8	991.35	977.84	1.36	997.85	973.24	2.47

b) Medio de ensayo: Ácido Sulfúrico 10 g/L

Los resultados de pérdida de masa para las muestras de mortero fueron menores o mayores a las de concreto según el caso, a diferencia de los resultados obtenidos en la solución con agua destilada, donde se encontró un patrón. La tabla 27 muestra el resumen de los valores obtenidos por muestra que estuvo en contacto con ácido sulfúrico 10 g/L:

Tabla 27: Registro de masas en el tiempo para los discos inmersos en ácido sulfúrico 10 g/L según el tipo de cemento. Fuente: propia.

Pérdida de masa ácido sulfúrico 10 g/L							
Características		Concreto			Mortero		
Tipo de cemento	Tiempo de exposición (semanas)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Δ Masa (%)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Δ Masa (%)
I	4	1013.99	998.43	1.53	1004.61	975.65	2.88
	8	1009.27	963.01	4.58	931.42	873.37	6.23
V	4	1048.76	1032.66	1.54	953.44	923.73	3.12
	8	1055.22	1011.96	4.10	956.30	908.00	5.05
IP	4	1041.88	1021.06	2.00	940.13	916.43	2.52
	8	974.61	929.55	4.62	970.85	922.25	5.01

5.5 Resultados de los análisis químicos

Como se mencionó en el acápite 2.3.1 el cemento presenta una composición esencialmente basada en silicatos y calcio, lo cual le otorga diversas propiedades al concreto. Por tanto, se registró cada 15 días la concentración de iones calcio presentes en los medios de ensayo, con la finalidad de evaluar la descomposición química de las muestras. Para ello, se extrajo una muestra de cada medio de ensayo antes del cambio quincenal del mismo. Se asumió que la pérdida de iones calcio por réplica sería similar, pues se encontraban bajo las mismas condiciones y fueron recopilados de la misma probeta.

a) Medio de ensayo: Agua destilada

El primer día de inmersión, el contenido de iones calcio fue el mismo en todos los sistemas, pues fueron vaciadas porciones iguales de un mismo lote de agua destilada en todos los recipientes de polipropileno; esta concentración inicial fue 0.112 mg/L. La tabla 28 muestra el resumen la cantidad de iones disueltos por muestra que estuvo en contacto con agua destilada.

Tabla 28: Registro de la cantidad de iones calcio disueltos por espécimen con exposición a agua destilada. Fuente: propia.

Iones calcio disueltos (mg/L): Agua destilada						
TIEMPO (SEMANAS)	CONCRETO			MORTERO		
	CIC	CVC	CIPC	CIM	CVM	CIPM
0	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112
2	8.583	12.379	5.590	8.054	25.296	10.779
4	6.358	16.355	4.513	18.404	16.901	8.074
6	5.460	6.061	4.699	5.666	7.665	6.004
8	7.563	6.554	5.186	5.635	6.810	6.140

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10 g/L

Los resultados para la solución de ácido sulfúrico fueron variables quincenalmente; sin embargo, las diferencias entre los tres diseños fueron mínimas. Las soluciones iniciales empleadas en cada cambio tenían un valor promedio de 0.47 mg/L de iones calcio. La tabla 29 muestra el resumen de la cantidad de iones calcio disueltos por muestra que estuvo en contacto con la solución de ácido sulfúrico.

Tabla 29: Registro de la cantidad de iones calcio disueltos por espécimen inmerso en solución de ácido sulfúrico. Fuente: propia

Iones calcio disueltos (mg/L): Solución de ácido sulfúrico (10 g/L)						
TIEMPO (SEMANAS)	CONCRETO			MORTERO		
	CIC	CVC	CIPC	CIM	CVM	CIPM
0	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
2	507.84	494.89	507.19	529.25	529.42	564.77
4	330.30	271.10	297.04	343.92	329.72	353.00
6	264.00	271.50	257.00	294.60	306.60	297.40
8	276.34	291.89	231.18	266.44	303.92	273.82

5.6 Variación del pH

Se registró también el pH de la solución semanalmente de 2 formas: mediante el uso de tiras reactivas de pH y con el equipo medidor de pH (potenciómetro), de los cuales se optó por la primera opción para realizar un control semanal y la segunda para un registro quincenal. Los materiales y/o equipos empleados se muestran en las figuras 31 y 32:



Figura 31: Agitador magnético (izquierda). Equipo medidor de pH o potenciómetro (centro). Ensayo en proceso (derecha). Fuente: propia.

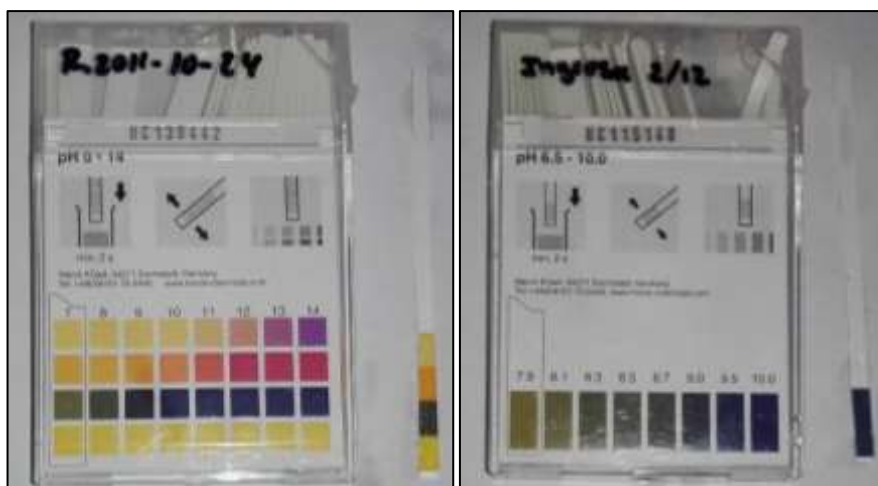


Figura 32: Tiras reactivas medidoras de pH. Fuente: propia.

Los métodos de medición se diferencian en su precisión, en el principio de medición y en el tiempo requerido ello. Por un lado, en el potenciómetro se aplica un método analítico que requiere una calibración con soluciones estándar (soluciones certificadas de pH conocido) y el valor de pH de la muestra se obtiene por asociación con la recta de calibración. Dependiendo del tipo de muestra y de la precisión requerida (estabilidad en el primer, segundo o tercer decimal) la medición puede requerir minutos u horas, pero el valor es más acertado pues el error es de 0.001 unidad de pH. Por otro lado, las tiras reactivas solo requieren 30 segundos para obtener un valor estimado; sin embargo, presenta un error de ± 1 unidad de pH. Se trata de una técnica semi cuantitativa, ya que han sido establecidos patrones de colores que son asociados a valores de pH expresados hasta con un decimal.

a) Medio de ensayo: Agua destilada

Las tablas 30 y 31 resumen el pH en la solución antes de cada cambio de agua destilada durante el periodo de inmersión, según el método empleado:

Tabla 30: Registro del pH quincenal con el potenciómetro. Fuente: propia

pH: Agua destilada						
TIEMPO (SEMANAS)	CONCRETO			MORTERO		
	CIC	CVC	CIPC	CIM	CVM	CIPM
0	6.308	6.308	6.308	6.308	6.308	6.308
2	8.511	8.265	8.173	8.408	11.445	11.248
4	10.433	10.747	9.959	11.151	11.234	10.811
6	6.578	7.701	7.921	8.369	8.062	7.909
8	8.298	9.275	7.632	9.486	9.770	7.763

Tabla 31: Registro del pH semanal con las tiras reactivas medidoras de pH. Fuente: propia.

pH: Agua destilada						
TIEMPO (SEMANAS)	CONCRETO			MORTERO		
	CIC	CVC	CIPC	CIM	CVM	CIPM
0	7	7	7	7	7	7
<1 (4días)	10.0	9.5	9.0	10.5	10.0	9.5
2	10	10	9	10	11	9
3	9.0	9.0	8.5	9.5-10	9.5-10	9.0
4	10.0	9.5	8.5	10.0	10.0	9.5
5	7.9	7.1	6.5	8.5	8.7	7.7
6	6.8	6.5	6.5	7.7	7.7	6.8
7	6.5	6.5	6.5	6.8	7.9	6.8
8	6.5	6.8	6.5	7.1	8.3	7.1

b) Medio de ensayo: Ácido Sulfúrico 10 g/L

Las mediciones del pH con ambos métodos se resumen en las tablas 32 y 33, con resultados similares para cada caso de alrededor de 1.

Tabla 32: Registro del pH semanal quincenal con el potenciómetro. Fuente: propia.

pH: Ácido sulfúrico						
TIEMPO (SEMANAS)	CONCRETO			MORTERO		
	CICS	CVCS	CIPCS	CIMS	CVMS	CIPMS
0	0.969	0.969	0.969	0.969	0.969	0.969
2	1.130	1.121	1.172	1.173	1.132	1.255
4	1.102	1.071	1.070	1.127	1.086	1.139
6	1.033	1.026	1.058	1.041	1.084	1.048
8	1.041	1.026	1.020	1.023	1.072	1.008

Tabla 33: Registro del pH quincenal con las tiras reactivas medidoras de pH. Fuente: propia.

pH: Ácido sulfúrico						
TIEMPO (SEMANAS)	CONCRETO			MORTERO		
	CICS	CVCS	CIPCS	CIMS	CVMS	CIPMS
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

5.6 Resultados Microscopía electrónica de barrido SEM

De las muestras en su estado inicial, solo se registraron fisuras en las muestras CIMP (CIM0) y CVMP (CVM0), de las cuales las de menor tamaño correspondieron a la última, tal como se muestra a continuación:

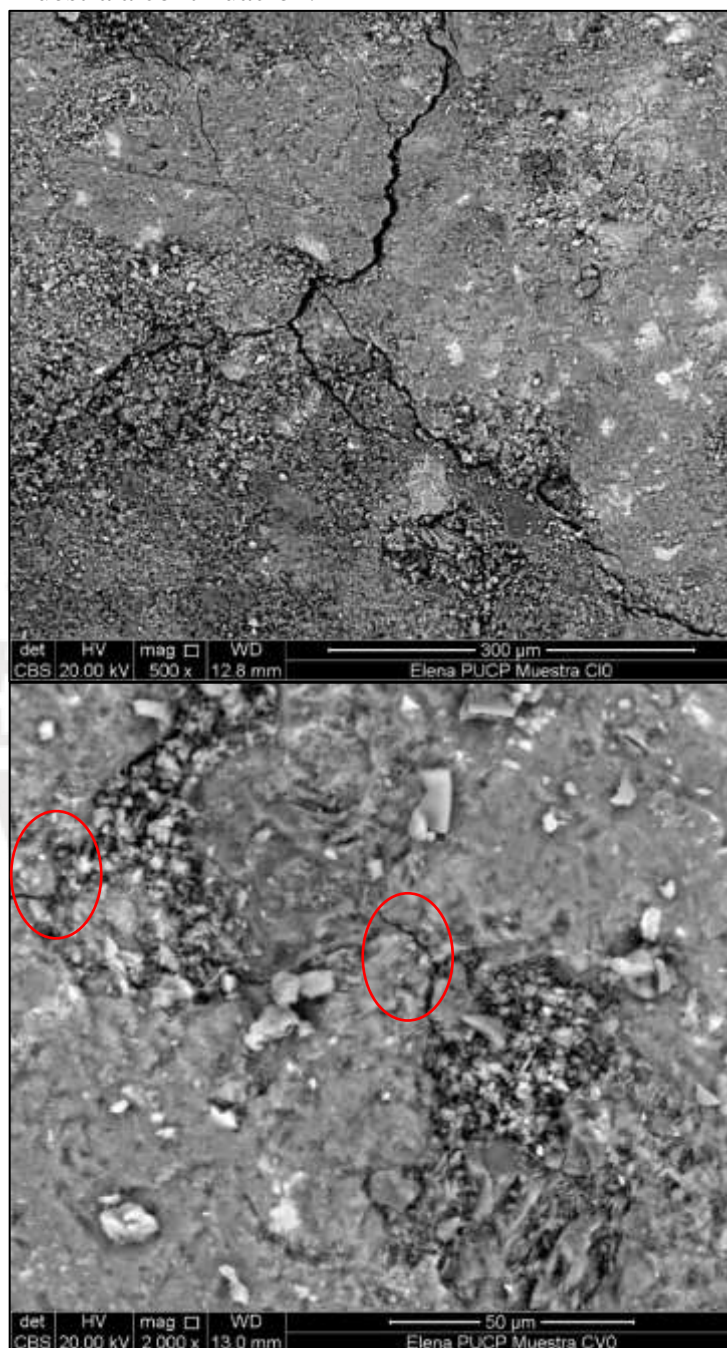


Figura 33: Imágenes SEM (500X y 2000X) de fisuras en las muestras CIM0 y CVM0 antes de ser inmersas en los medios (500x).

En cuanto a la variación de la microestructura, se realizó el ensayo a las muestras que estuvieron inmersas las 8 semanas, donde los cambios serán mostrados en los ítems correspondientes a continuación.

a) Medio de ensayo: Agua destilada

La figura 34 muestra el contraste inicial y final para cada espécimen.

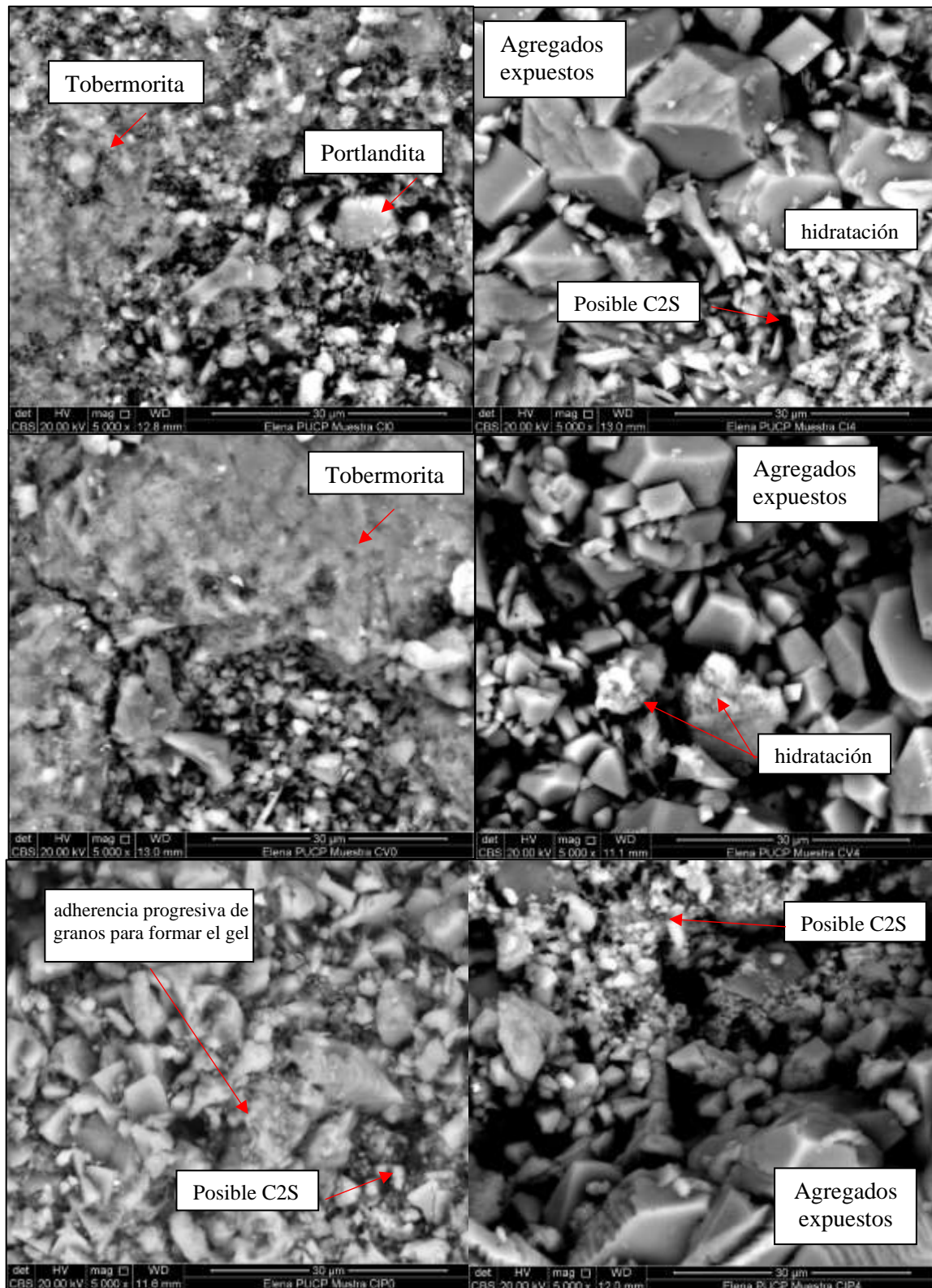


Figura 34: Imágenes SEM (5000X) Variación de la microestructura de las muestras en agua destilada. Muestras en t=0 semanas (izquierda) y en t=8 semanas (derecha). Fuente: propia.

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10g/L

La figura 35 muestra el contraste inicial y final para cada espécimen.

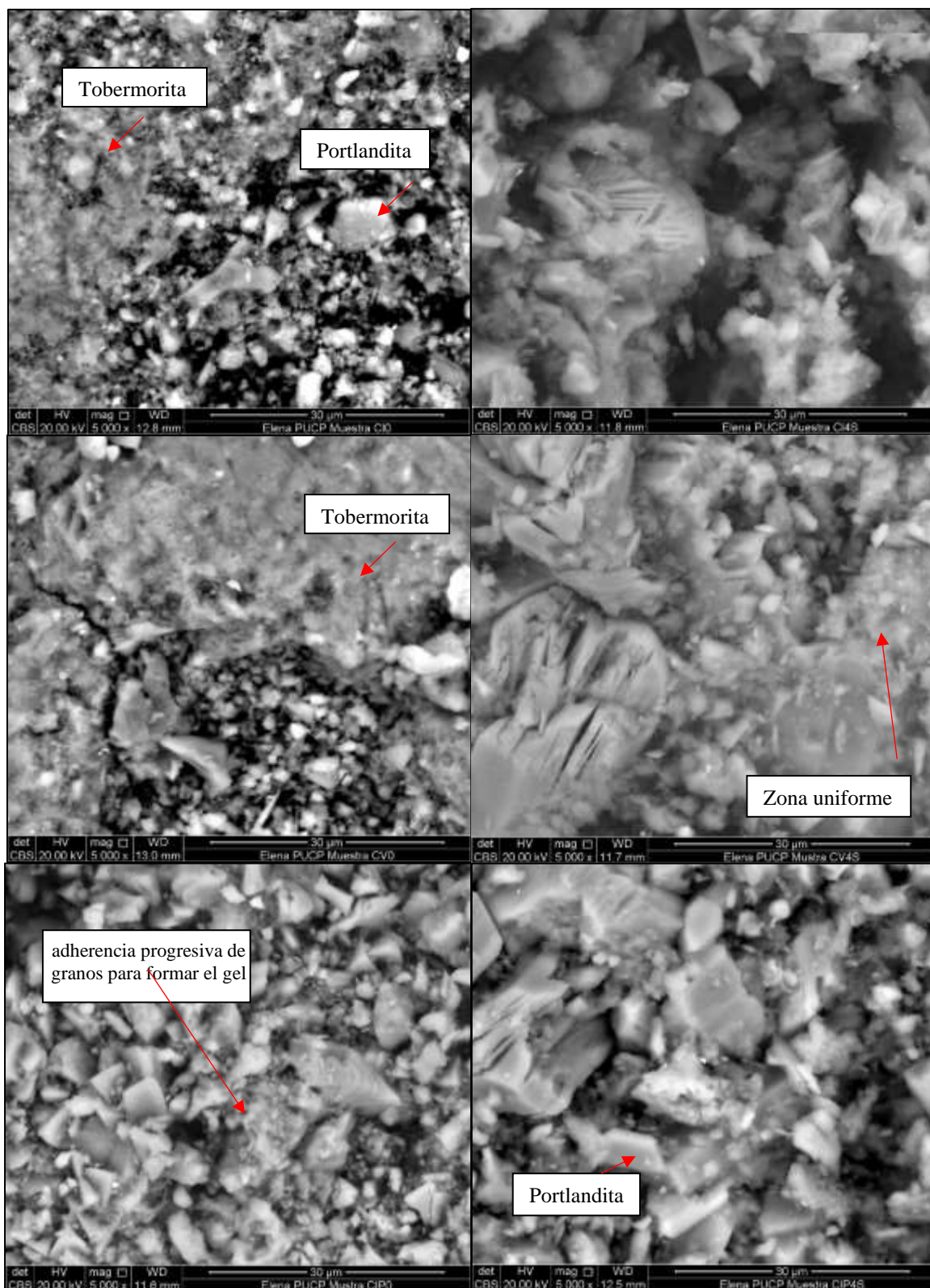


Figura 35: Imágenes SEM (5000X) Variación de la microestructura de las muestras en ácido sulfúrico (10 g/L). Muestras en t=0 semanas (izquierda) y en t=8 semanas (derecha). Fuente: propia.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Evaluación del tipo de cemento empleado

Se emplearon cementos portland convencionales tipo I y tipo V, el primero por ser de uso común y el segundo por su resistencia a cierto tipo de ataque químico debido al menor contenido de C3A que causa que el concreto se hinche o desprenda. Según el informe de calidad brindado por el proveedor, ambos cementos cumplen con las normas ASTM C150 y NTP 334.009. En el anexo A1 de dichas normas, se establecen ecuaciones para el cálculo de las fases mineralógicas de cada cemento. Los informes de calidad indicaban la composición de cada fase por tipo de cemento convencional, lo cual se detalla en la tabla 34.

Tabla 34: Componentes del cemento tipo I y V. Fuente: Ficha técnica cemento.

FASES MINERALÓGICAS SEGÚN BOGUE		
PROPIEDADES	Cemento tipo I	Cemento tipo V
% SILICATO TRICÁLCICO (C3S)	55.81	56.10
% SILICATO DICÁLCICO (C2S)	17.01	19.91
% ALUMINATO TRICÁLCICO (C3A)	6.96	1.74
% FERROALUMINATO TETRACÁLCICO (C4AF)	10.38	14.67

Por otro lado, para el tercer diseño, se empleó un cemento con adición de puzolana, el cual cumple las normas ASTM C595 y NTP 334.090. En estas normas no aplican las ecuaciones para el cálculo de fases mineralógicas. Sin embargo, se puede deducir que el porcentaje de los óxidos cálcicos respecto al peso es menor en este tipo de cemento comparado a los otros debido a la adición de puzolana.

6.2 Evaluación del agregado fino

Los agregados fueron extraídos de la cantera Jicamarca. Estos fueron analizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la PUCP, cuyos resultados de análisis son presentados en la tabla 35.

Tabla 35: Resumen del análisis de las propiedades del agregado fino
(Laboratorio de Mecánica de Suelos – PUCP y UNICON).

PROPIEDADES	Resultados	Requisitos ASTM C33-17 / NTP 400.037:18	Valores recomendados	Observaciones
P.U. suelto (Kg/m ³)	1494	-	1500 - 1700	Ligeramente menor
P.U. compactado (Kg/m ³)	1618	-	-	-
P.e (kg/m ³)	2647	-	2600 - 3000	Cumple
M.F.	3.14	2.3 – 3.1	-	0.1 % superior
Granulometría	Gráfico 1	Rango normado	-	Cumple
%abs	1.39	-	-	-
% Pasante malla #200	6.29	< 7	-	Cumple
Azul de metileno mg/g	1.92	<5	-	Cumple

- Las propiedades del agregado fino según la evaluación granulométrica, el porcentaje de malla 200 y el valor de azul de metileno estuvieron dentro del rango especificado por las normas NTP y ASTM. Por ello, al ser un agregado normado, se pudo emplear el método de diseño de mezcla ACI 211.1-91.
- El MF presentó un valor 0.1% por encima del valor máximo permitido, lo cual fue considerado aceptable. Valores muy altos del módulo de fineza podrían generar mezclas ásperas y requerirían realizar compensaciones, como, por ejemplo, cambio de piedra por arena para la obtención de mezclas uniformes.
- El peso específico y el peso unitario estuvieron alrededor de los rangos recomendados por el ACI en el libro “Naturaleza y Materiales del Concreto” (Rivva, 2000). Dichos datos y el % de absorción fueron empleados para el diseño de mezcla según el método ACI.
- El peso unitario suelto fue 1.49 gr/cm³ y el peso unitario compactado fue 1.62 gr/cm³. Este último es mayor debido a la consolidación del material.
- De los resultados obtenidos se pudo deducir que las condiciones iniciales del agregado fino mostraban un alto porcentaje de humedad. Ese dato es de suma importancia, pues la arena con un alto valor de humedad no aporta agua al concreto de la misma forma que cuando esta ingresa por sí sola debido a que en

el traslado puede existir cierta pérdida del agua del agregado. Además, ello puede generar menores valores de slump y/o un mayor consumo de aditivo reductor de agua. Posteriormente, en las fechas programadas para las mezclas, esta propiedad fue variando, tal como se muestra en la tabla 36.

Tabla 36: Variación del porcentaje de humedad del agregado. Fuente: propia.

VARIACIÓN DE LA HUMEDAD			
DISEÑO CON CEMENTO	FECHA	ARENA (%)	GRAVA (%)
Tipo I	24/07/2018	5.91	1.19
Tipo V	31/07/2018	5.18	2.71
Tipo IP	02/08/2018	5.44	2.71

6.3 Evaluación del agregado grueso

Los agregados gruesos también fueron obtenidos de la misma cantera Jicamarca. De los resultados (Tabla 37) se observó lo siguiente:

Tabla 37: Resumen del análisis de las propiedades del agregado grueso. Fuente: propia.

PROPIEDADES	Resultados	Requisitos ASTM C33-17 / NTP 400.037:18	Valores recomendados	Observaciones
P.U. suelto (Kg/m³)	1520	-	1500 - 1700	Cumple
P.U. compactado (Kg/m³)	1665	-	-	-
P.e (kg/m³)	2734	-	2600 - 3000	Cumple
TM (")	$\frac{3}{4}$	1" - #4	-	Cumple
M.F.	6.87	6.6 – 7.2	-	Cumple
Granulometría	Gráfico 2	Huso 57	-	Cumple
%abs	0.75	-	-	-
%w	0.47	-	-	-
% Pasante malla #200	0.31	< 1	-	Cumple

- Las propiedades del agregado grueso como la granulometría, el MF y el porcentaje de malla 200 estuvieron dentro de los rangos especificados por las normas NTP y ASTM. Por ello, al ser un agregado normado, se pudo emplear el método de diseño de mezcla ACI.
- El agregado grueso no presentó alto contenido de humedad para ninguna mezcla. Su mayor valor fue 2.71%, por lo que el aporte de agua fue menor y no afectó a la trabajabilidad del concreto.

- El peso específico y el peso unitario estuvieron alrededor de los rangos recomendados por el ACI en el libro “Naturaleza y Materiales del Concreto” (Rivva, 2000). Dichos datos y el % de absorción fueron empleados para el diseño de mezcla según el método ACI.

6.4 Evaluación del concreto fresco

La norma E.060 especifica ciertas consideraciones en cuanto a la temperatura. En el caso de la temperatura ambiente, cuando sea menor que 5° C o mayor que 35° C, la norma indica que se debe llevar un registro de las temperaturas del concreto y de la protección dada al concreto durante su colocación y curado (RNE, 2009). Como se puede apreciar en la tabla 26, no fue el caso para ninguna mezcla. Del mismo modo, la misma normativa indica que la temperatura del concreto a colocar no debe ser mayor que 32°C pues de ser así se deben tomar medidas para su protección (RNE, 2009). Sin embargo, los resultados obtenidos fueron menores que dicho límite.

El ensayo del slump permitió analizar propiedades como cohesión y forma de falla, así como también validar el diseño para el asentamiento requerido. Las tres mezclas tuvieron un slump de 6 ½” con tipo de falla normal. Según la ASTM C143, los concretos con fallas tipo corte probablemente carezcan de plasticidad y cohesión (ASTM, 2015); si bien la norma de premezclado no indica que se deba rechazar la mezcla, estas características dificultan el proceso de colocación del concreto, por lo que una falla normal es lo ideal como en este caso.

El contenido de aire varió entre 0.9% y 1.3%. Estos valores están dentro de los valores sugeridos por el método de diseño del ACI 211.1-91, el cual estima en 2% la cantidad máxima referencial del aire atrapado.

Según la norma ASTM C138-17: “Método de prueba estándar para densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) de concreto 1” y la NTP

339.046.2008: “Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón (concreto)”, rendimientos mayores que 1.00 indican exceso de producción de concreto y valores menores indican que el volumen de la mezcla será corto en relación al volumen diseñado. Sin embargo, cuando la variación del peso volumétrico es menor que 2.5% no se necesita corrección (Navarro, 2015), como en este caso.

6.5 Evaluación del concreto endurecido

Según la guía ACI 211.1S-98 (tabla 18), para una relación w/c igual a 0.5, se estima una resistencia entre 300 y 350 Kg/cm², por lo que un valor promedio esperado es de 325Kg/cm². De los resultados obtenidos sobre la resistencia a la compresión para cada diseño, el gráfico 6 resume los valores de esfuerzo vs tiempo.

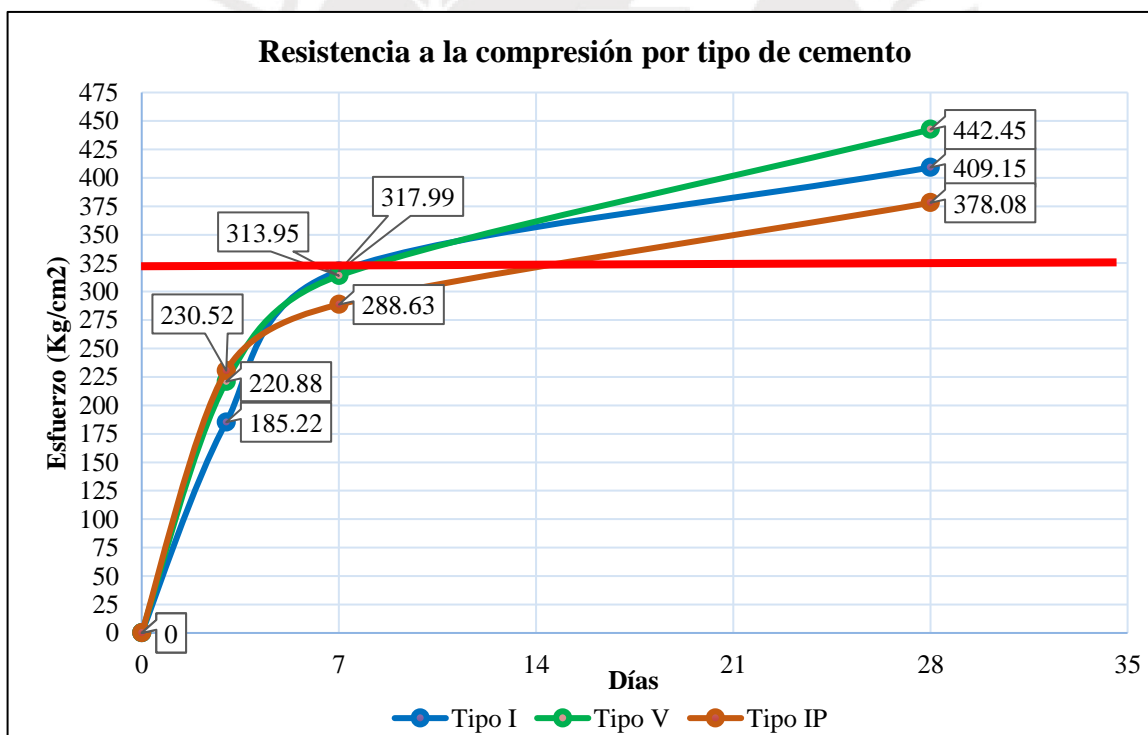


Gráfico 6: Variación de la resistencia a la compresión por tipo de cemento. Fuente: propia.

Se puede observar que, a los 3 días, las probetas CIPC tiene una ventaja de aproximadamente 45 kg/cm² y 10 kg/cm² respecto a los diseños CIC y CVC respectivamente. Además, al mismo tiempo, las 3 muestras superan el 50% de la resistencia esperada de 325 kg/cm².

A los 7 días, se observa una menor diferencia entre las 3 probetas. El diseño CIP presenta una resistencia de alrededor de 27 kg/cm^2 menor que los demás. En este caso, todas las muestras presentaron una resistencia superior al 75% de la estimada. Además, según lo mencionado en el acápite 4.1, se esperaba que el desarrollo de resistencia del concreto con cemento tipo IP sea lento en comparación a los demás, por lo que se pudo comprobar con los resultados mostrados. Por otro lado, en los siguientes capítulos, se puede observar la influencia de la demora en la formación de productos de hidratación del cemento para el desarrollo de resistencia en cuanto al incremento de masa en las muestras inmersas en agua destilada. Entonces, especímenes inmersos mayor tiempo en el medio de estudio perdieron menor cantidad de masa respecto a los que estuvieron menos tiempo, pues productos de hidratación desarrollados a largo plazo influyeron en la masa registrada a 8 semanas.

Finalmente, la diferencia entre los 3 especímenes a los 28 días es más diferenciada, donde la variación de resistencia es de 30 kg/cm^2 respecto al diseño CIC con un promedio de 409 kg/cm^2 . Por lo tanto, se podría decir que, en cuanto a resistencia a la compresión, el concreto con cemento tipo I es la opción intermedia. El diseño CVC presenta mayores resultados y el CIP los menores. Todos superan la resistencia esperada. Esto es beneficioso pues, dependiendo el proyecto, se podría optimizar la cantidad de cemento a emplear hasta alcanzar un valor cercano a la resistencia requerida reduciendo a su vez la cantidad de agua para la obtención de la misma relación w/c. Es decir, los diseños con cemento tipo I o V podrían incluso ser más económicos de lo ya calculado.

6.6 Evaluación de la inspección visual

a) Medio de ensayo: Agua destilada

La comparación de los cambios observados en las probetas de los tres es resumida en la tabla 38.

Tabla 38: Comparativo de los cambios detectados entre las probetas de los distintos diseños. Fuente: propia.

CONDICIÓN ACTUAL DE LA MUESTRA EN AGUA DESTILADA			Comparativo entre diseños	Observaciones
MEDIO DE ENSAYO	Coloración blanquecina		$CV > CI > CIP$	Más intensa los primeros 15 días.
	Contenido de partículas		$CV > CI > CIP$	Más notorio los primeros 15 días.
CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL CONCRETO	Estado general	Satisfactorio	-	No se registraron cambios notables.
		Bueno	$CI \approx CV \approx CIP$	
		Pobre	-	
	Superficies formadas y terminadas	Huecos de aire en la superficie	$CI \approx CV \approx CIP$	-
		Exposición superficial de los agregados	$CI \approx CV \approx CIP$	-
		Coloración	$CI \approx CV \approx CIP$	-
	Lixiviación		$CV > CI > CIP$	-
	Textura	Cara expuesta	$CI \approx CV \approx CIP$	-
		Cara no expuesta	$CI \approx CV \approx CIP$	-
	INSPECCIÓN EN ESTEREOSCOPIO (4X)	Formación de minerales	$CI \approx CV \approx CIP$	-
		Visualización de agregados	$CI \approx CV \approx CIP$	-

En la tabla anterior se evaluaron cambios en distintos aspectos para los 3 diseños. En el caso de las muestras de mortero, los cambios visuales fueron de mayor intensidad. Se puede apreciar que la mayoría de observaciones encontradas fueron similares entre los 3 tipos de diseño. Por ello, se discutirá con mayor profundidad los resultados en los que existan diferencias entre los tres diseños.

Los puntos directamente relacionados con la lixiviación, como coloración blanquecina y contenido de partículas en el medio, dieron como resultado un cambio más notorio para el diseño con cemento tipo V y cambios de menor intensidad para el diseño con cemento tipo IP. Las observaciones respecto a la coloración blanquecina en los medios de ensayo pueden ser explicadas en términos de la disolución de compuestos de calcio. Las sales de calcio son, por lo general, de color blanco; además, el calcio es el componente del cemento en mayor proporción, por lo que no es de extrañar que su disolución sea preferente.

El proceso de lixiviación crea gradientes de concentración de calcio en una capa entre la superficie (que está en contacto con el medio de ensayo) y el núcleo de las muestras, los cuales cambian el equilibrio químico en la capa y los productos de hidratación

comienzan a disolverse. Al existir en las probetas de mortero y de concreto mucho mayor cantidad de iones calcio que en el agua destilada, la tendencia natural es que se disuelvan los iones calcio de la fase en la cual se encuentran en mayor concentración (mortero/concreto) y difundan hacia el medio en el cual estén en menor proporción (agua destilada), buscando que se llegue a una situación de equilibrio. A lo largo del proceso, la concentración de iones calcio en el interfaz concreto/agua destilada es mayor que en el resto de la probeta, entonces esto promueve la difusión de iones calcio hacia la superficie, y así sucesivamente. En este fenómeno radica la ‘corrosividad’ de las aguas puras (con bajo contenido de sales) frente a estructuras de concreto.

Mientras estén completamente disueltos en el agua los iones calcio son incoloros; para detectarlos y determinar su concentración es necesario realizar análisis químicos (ver resultados en apartado 5.5). Por lo tanto, la coloración blanquecina observada en el medio de ensayo correspondería más bien a compuestos de calcio insolubles. Esto puede ser atribuido a un ‘desmoronamiento’ progresivo de las probetas de concreto y mortero, debido a que la lixiviación de calcio de algunas fases conduce a una merma en la estabilidad de la estructura en su conjunto. Las determinaciones de pérdida de masa de las probetas en forma de disco (ver apartado 5.4) proporcionan evidencias a este respecto. Esta sería una segunda consecuencia de la corrosividad de las aguas puras frente a estructuras de concreto.

La comparación cualitativa de la coloración blanquecina observada en el medio de los recipientes de ensayo puede, luego, llevar a concluir sobre qué diseño la acción corrosiva del agua destilada fue mayor. El análisis comparativo de los contenidos de iones calcio disueltos contribuye a reforzar dicha conclusión, por ejemplo, el apartado 6.8 indica resultados mayores para muestras CV y menores para CIP.

Sobre la base de dichas comparaciones la corrosividad del agua destilada frente a los

diseños de mezcla estudiados resultó en el siguiente orden (de mayor a menor): CV > CI > CIP.

En la figura 36 se puede observar mayor contenido de partículas de color blanco en las zonas de las circunferencias formadas en la posición de los discos que estuvieron en el recipiente, para especímenes CV. El recipiente con muestras CIP mostró menor contenido de partículas en las circunferencias formadas. Ello está relacionado con que, para un cemento tipo IP, el contenido de puzolanas reduce un porcentaje de los compuestos cálcicos para un mismo peso; es decir, existe un menor contenido de iones calcio en la pasta, por tanto, menor cantidad de iones que disolver.



Figura 36: Material lixiviado en la base del recipiente con muestras CV (izquierda). Material lixiviado en la base del recipiente con muestras CIP (derecha).

Si bien el proceso de lixiviación mostró rápidamente cambios notables durante los primeros días de exposición, la intensidad de lixiviación disminuyó en el tiempo conforme pasó el tiempo, pues la coloración y las cantidades de sedimentos de color blanco en el medio se redujeron, luego de los cambios quincenales del agua destilada. Ello puede explicarse de la siguiente manera: cuando el contenido de calcio disminuye en la solución de poros, el silicato de calcio hidratado (C-S-H) también pierde calcio hasta alcanzar una cierta concentración, donde el hierro y el aluminio, liberados de los hidratos cristalizados, se incorporan parcialmente en un gel residual de C-S-H. Ello mejora la estabilidad de dicho gel y ralentiza la disolución en un grado significativo (Ekström, 2001). Por tanto, dicha estabilidad fue lo que generó que el proceso de

lixiviación del material sea más lento tras los primeros 15 días de exposición en condiciones estáticas.

Cuando el agua se mueve por distintas causas, la capa de difusión delgada se lava y el agua en contacto directo con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disuelve el sólido casi instantáneamente (Ekström, 2001). En las aplicaciones (canaletas para aguas de lluvia, por ejemplo) normalmente el agua pura está en constante movimiento, lo cual involucra una renovación constante de dicha sustancia en el tiempo.

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10 g/L

A diferencia de la acción del agua destilada como medio de ensayo, en la solución de ácido sulfúrico 10 g/L no hubo un diseño que mediante alguna de las observaciones mencionadas haya destacado respecto a los otros, pues todos tuvieron los mismos resultados a simple vista, tal como se indica en la tabla 39 y en la figura 37.

Tabla 39: Comparativo de los cambios detectados entre los distintos diseños. Fuente: propia.

CONDICIÓN ACTUAL DE LA MUESTRA EN ÁCIDO SULFÚRICO 10 g/L			Comparativo entre diseños	Observaciones
MEDIO DE ENSAYO	Coloración		CI \approx CV \approx CIP	-
	Incremento de temperatura		CI \approx CV \approx CIP	-
	Contenido de partículas		CI \approx CV \approx CIP	Gran cantidad quincenal
CONCRETO CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL	Estado general	Pobre	CI \approx CV \approx CIP	Deterioro notorio
	Superficies formadas y terminadas	Huecos de aire en la superficie	CI \approx CV \approx CIP	Todos en ambas caras.
		Erupciones	CI \approx CV \approx CIP	Cambio inicial a los 15 días
		Exposición superficial de los agregados	CI \approx CV \approx CIP	-
		Coloración	CI \approx CV \approx CIP	Inmediata a los 7 días.
	Lixiviación		CI \approx CV \approx CIP	Notoria.
	Textura	Cara expuesta	CI \approx CV \approx CIP	-
		Cara no expuesta	CI \approx CV \approx CIP	-
	INSPECCIÓN EN ESTEREOSCOPIO (4X)	Delaminación en cara expuesta	CI \approx CV \approx CIP	-
		Coloración rojiza en cara no expuesta	CI \approx CV \approx CIP	-
		Formación de cristales en cara no expuesta	CI \approx CV \approx CIP	-

Los notorios cambios observados son atribuibles a la elevada acidez del medio (ácido sulfúrico 10 g/L), ocasionando un deterioro rápido del concreto y del mortero, no solo

mediante el proceso de lixiviación que ya de por sí causa el medio acuoso, sino también porque el medio ácido disuelve con mayor facilidad los compuestos que componen el concreto, conduciendo a un rápido desmoronamiento de su estructura. Esto fue evidenciado no solo por las diferencias observables a simple vista respecto a la muestra patrón, sino también por los restos de material encontrados semanalmente en la base de los recipientes que contenían los especímenes. En estructuras reales no es usual que se diseñe el concreto para estar en contacto directo con ácido sulfúrico u otros ácidos fuertes, pero esto puede ocurrir accidentalmente cuando el medio de protección adicional utilizado (geomembranas, por ejemplo) sufre algún daño; por la información obtenida en este estudio se destaca que deben preverse medidas que permitan detectar oportunamente este tipo de problema, ya que el deterioro ocurre muy rápidamente, con desmoronamiento del concreto.

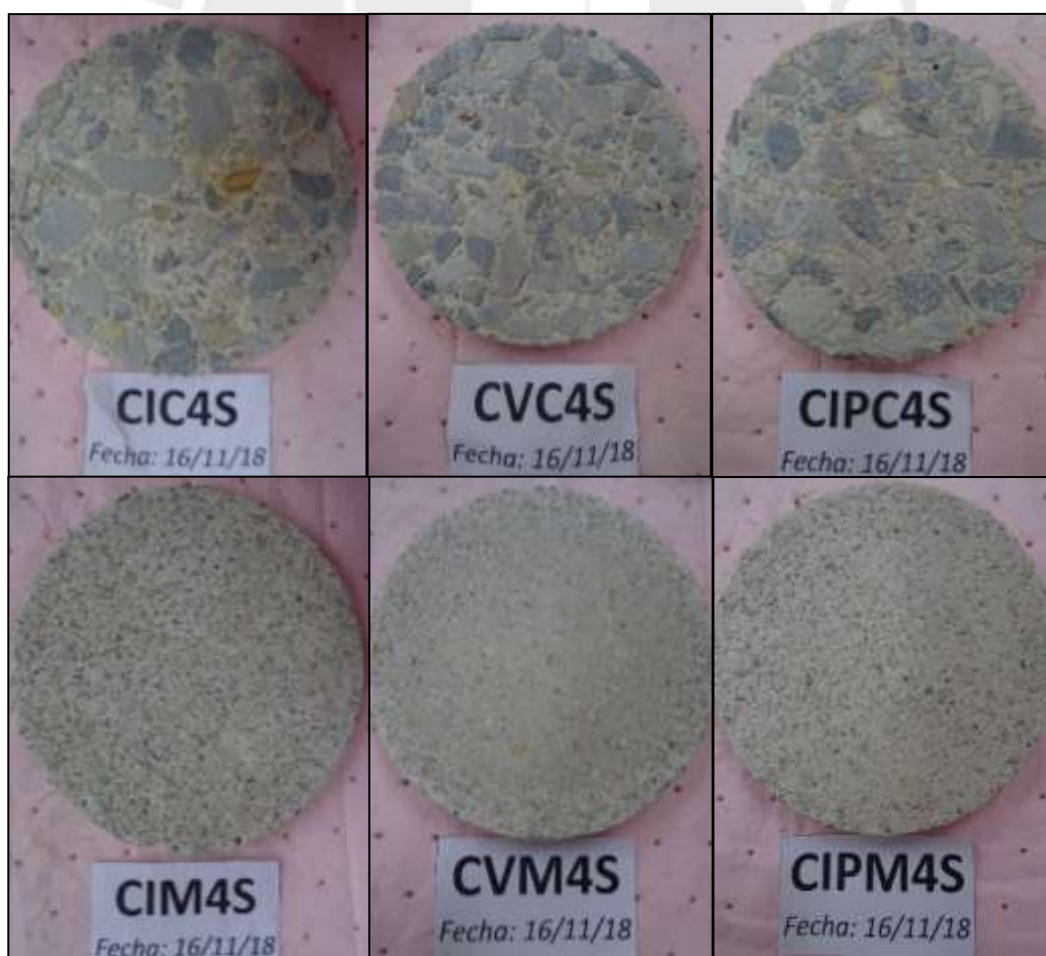


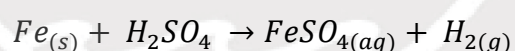
Figura 37: Discos a las 8 semanas de inmersión sin diferencias notorias entre ellos. Fuente: propia.

El desmoronamiento del concreto fue notorio desde el día 4 por lo que, debido a la formación de espacios vacíos en zonas que deberían ser herméticas o la desestabilización de la estructura a causa de ello, debe considerarse un factor de seguridad en el diseño de la estructura. Además, se debe evaluar el comportamiento del recubrimiento en vacío antes de elegirlo. Por otro lado, el medio fuertemente ácido neutraliza la alcalinidad propia del concreto, lo cual dejaría al acero embebido sin protección por pasivación, en estructuras de concreto armado.



Figura 38: Disco de concreto con material lixiviado. Fuente: propia.

Se podría decir que la reacción del componente Fe del concreto y la solución de ácido sulfúrico a 10 g/L pudo también haber generado el siguiente producto:



Por un lado, el producto $FeSO_4$ comprobaría la coloración rojiza en la cara no expuesta de los discos y, por otro lado, el gas H_2 sería la causa de las burbujas formadas durante los primeros días en el medio de estudio.

Cuando una estructura de concreto o de concreto armado va a estar en contacto con medios que tienen muy altos contenidos de sulfatos se recomienda utilizar un cemento adecuado dependiendo de la concentración según la norma E.060 de Concreto Armado (ver tabla 7), para prevenir o reducir el impacto de deterioro por el llamado ‘ataque por sulfatos’, que causa hinchazón del concreto primero (por formación de sulfoaluminatos

cálcicos, compuestos muy voluminosos), y luego su desmoronamiento. De acuerdo a los resultados de este estudio, aparentemente, la concentración de ácido sulfúrico utilizada no fue suficiente para que tenga lugar el fenómeno de hinchazón, ya que esta morfología de deterioro no fue observada, más sí el progresivo desmoronamiento.

6.7 Evaluación de la pérdida de masa

a) Medio de ensayo: Agua destilada

De la tabla 34 se procesaron los datos para los especímenes de concreto y mortero, con fines comparativos. A continuación, el gráfico 7 y 8 muestra dicha data procesada.

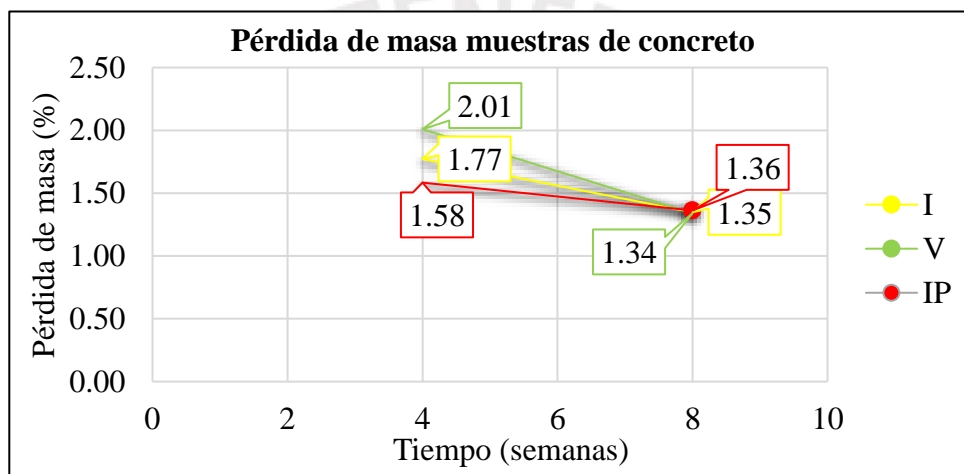


Gráfico 7: Pérdida de masa en el tiempo para discos de concreto. Fuente: propia.

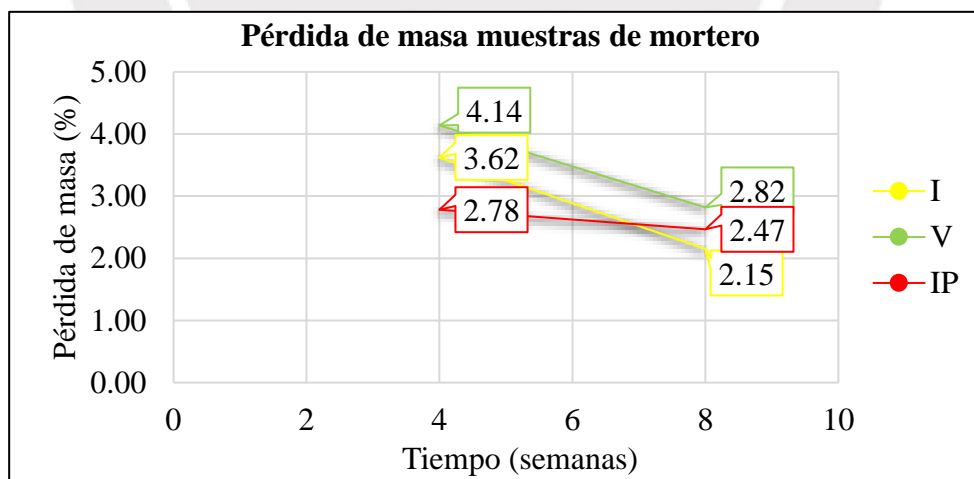


Gráfico 8: Pérdida de masa en el tiempo para discos de mortero. Fuente: propia.

- Las probetas (de concreto y de mortero) de los tres diseños mostraron la misma tendencia de comportamiento en agua destilada para un tiempo de exposición de 4 semanas, en función de su pérdida de masa: $CV > CI > CIP$

- La mayor pérdida de masa se produjo al inicio de la exposición, siendo menor para el segundo período. Este comportamiento es normal en algunos sistemas de corrosión; al inicio tienen lugar las reacciones y procesos propios de cada sistema, hasta que se alcanza (cuando esto es posible) una situación de reposo o estabilidad, para la cual la velocidad de corrosión es aproximadamente constante. Además, probablemente, durante las últimas 4 semanas se produjo la formación de otros productos al reaccionar el concreto con el medio de estudio, como por ejemplo el C2S.
- El agua con bajo contenido de sales fluye a través del concreto, lo cual origina que los compuestos de hidratación se disuelvan. Los materiales sólidos que se disuelven dependen de su solubilidad (Ekström, 2001). Los agregados juegan un papel importante en morigerar el deterioro por el contacto con agua destilada, pues el hidróxido de calcio tiene fácil solubilidad (Ekström, 2001), la cual es de 0.160 g por cada 100 ml de agua destilada (a 20 °C), y esto es particularmente cierto para los cementos tipo V y I. En el caso del cemento IP también se observa el efecto, pero con mayor intensidad. Por tanto, la composición química del cemento IP puede favorecer reducir la solubilidad del concreto.

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10 g/L

De la tabla 35 se procesaron los datos para los especímenes de concreto y mortero, con fines comparativos y los gráficos 9 y 10 muestran dicha data procesada. Sin embargo, en este caso las líneas de tendencia para cada muestra de mortero no eran similares a los resultados con concreto.

- La evaluación de la determinación de la pérdida de masa revela que este no es un criterio de valoración del deterioro válido para concreto o mortero de los tres diseños en ácido sulfúrico. En el diseño del presente estudio se preveía que los daños serían

mayores, pero no se encontraron datos en la literatura acerca de la velocidad, así como tampoco de las características del deterioro.

- Observando las gráficas, tanto para concreto como para mortero, se encuentra que al finalizar las 8 semanas de exposición el resultado es casi el mismo ($\Delta(\% \Delta m) \approx \pm 1$). Dicho de otra manera: el deterioro es independiente del tipo de cemento utilizado para dicho período de exposición.
- Para las 4 semanas de exposición todavía se pueden diferenciar los comportamientos. Las probetas de CIP muestran el peor comportamiento en concreto, pero el mejor en mortero; las probetas de CV muestran un comportamiento intermedio en ambos casos, mientras que las de CI muestran el comportamiento inverso al de las probetas CIP. En otras palabras, se reiteraría la poca utilidad de los ensayos gravimétricos (pérdida de masa) frente a ácido sulfúrico.
- Finalmente cabe resaltar que, normalmente los métodos existentes que comparan tipos de diseño se realizan mediante muestras de mortero (Girardi, Vaona y R. Di Maggio, 2010). En dichas metodologías, normalmente se observa que los muestras con adiciones presentan mejores resultados; sin embargo, en este caso se puede observar que los resultados para mortero y concreto difieren. Por tanto, convendría analizar otros tipos de ensayos con la finalidad de evaluar propiamente el concreto.

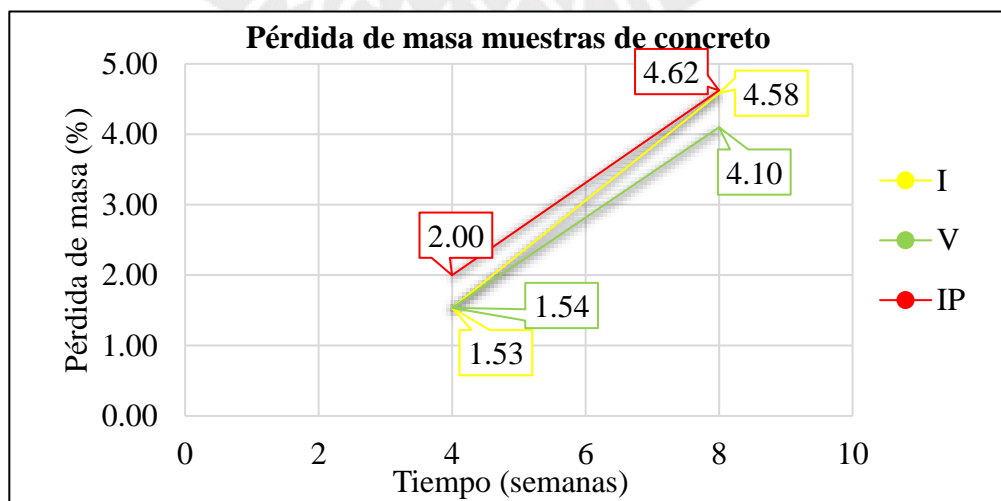


Gráfico 9: Pérdida de masa en el tiempo para discos de concreto. Fuente: propia.

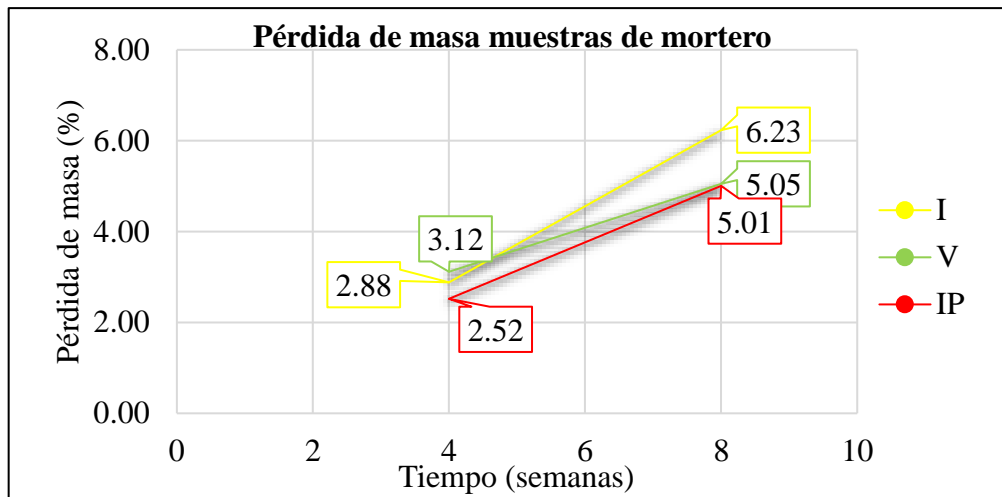


Gráfico 10: Pérdida de masa en el tiempo para discos de mortero. Fuente: propia.

6.8 Evaluación de los análisis químicos

Debido a que en la realidad los medios de estudio se encuentran en constante movimiento o cambio, las soluciones fueron renovadas quincenalmente para simular con mayor aproximación la variación del medio en el tiempo. Por tanto, se pudo estimar aproximadamente la pérdida de iones calcio de las muestras cada dos semanas mediante el análisis de la solución. Por otro lado, al calcular el valor acumulado de los datos anteriores se estimó la pérdida acumulada en el tiempo.

a) Medio de ensayo: Agua destilada

El bajo contenido de sales disueltas propio de este medio se manifestó en el resultado inicial de iones calcio determinados, donde se obtuvo un valor de 0.112 mg/L.

Según la tabla 10, al igual que con la pérdida de masa, el mayor contenido de iones disueltos para las muestras de concreto se produjo al inicio de la exposición debido a que alcanzó su estabilidad a las 4 semanas, siendo menor para el segundo periodo en el que la velocidad de deterioro es aproximadamente constante. Por otro lado, los especímenes de mortero mostraron una tendencia variable cada quincena pues el diseño que tenía los más altos resultados a las dos semanas, ya no la tenía a las 4 semanas, por lo que podría considerarse que las metodologías que realizan estudios comparativos de

cemento con muestras de mortero pueden tener resultados diferentes a corto y largo plazo.

Las probetas (de concreto y de mortero) de los tres diseños mostraron la misma tendencia de comportamiento en agua destilada para un tiempo de exposición de 8 semanas, en función de la cantidad de iones disueltos: $CV > CI > CIP$. Los gráficos 11 y 12 muestran la concentración de iones calcio acumuladas en el tiempo.

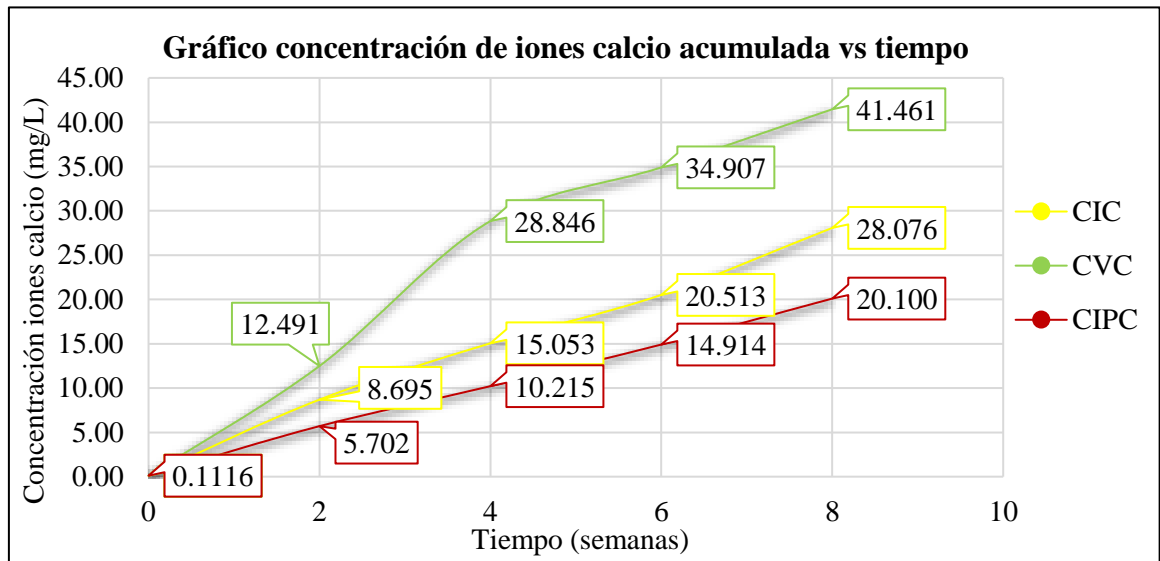


Gráfico 12: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para concreto. Fuente: propia

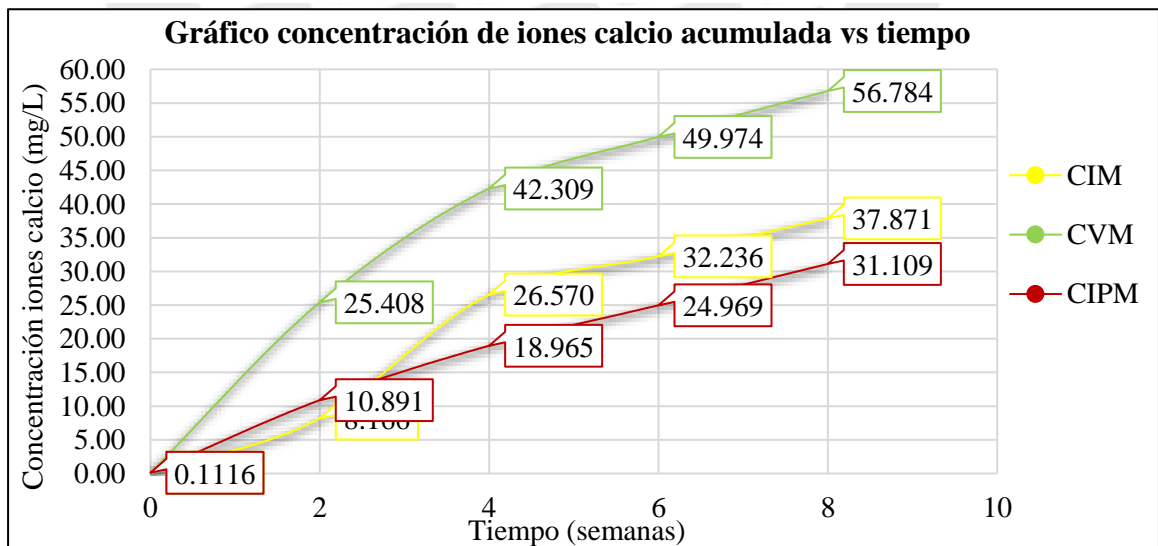


Gráfico 11: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para mortero. Fuente: propia

En base a la información recopilada cada 2 semanas, se estima que la velocidad de lixiviación de calcio por día es la siguiente:

Tabla 40: Velocidad de lixiviación referencial en agua destilada durante la semana "t". Fuente: propia

Velocidad de lixiviación en la semana t (mg/día)						
Tiempo "t" (semanas)	CIC	CVC	CIPC	CIM	CVM	CIPM
2	12.3	17.7	8.0	11.5	36.1	15.4
4	9.1	23.4	6.4	26.3	24.1	11.5
6	5.9	6.5	5.0	6.1	8.2	6.4
8	8.1	7.0	5.6	6.0	7.3	6.6

Se observa entonces, que las muestras con cemento tipo V tienen mayor velocidad de lixiviación. Ello, probablemente a que sus compuestos C3S y C2S se presentaban en mayor porcentaje respecto al resto de cementos. Por tanto, dependiendo de la condición a la que estará expuesta la estructura y su vida útil, se debe definir un valor aceptable de deterioro en el tiempo. Cabe resaltar que la velocidad podría ser mayor para estructuras que almacenen medios dinámicos, por ejemplo, canales de agua.

Para los canales, que tienen una vida útil promedio de 30 años, se puede considerar que a largo plazo la velocidad de lixiviación se estabiliza, siendo el caso más crítico el cemento tipo V a 7 mg/día y el caso más favorable el cemento tipo IP con 5.6 mg/día. En caso de elementos pobres en áridos gruesos (mal diseñados), el deterioro podría ser mayor tomando como referencia los resultados de las muestras de mortero.

En la zona costera, donde es común la construcción de canales que en su mayoría no poseen materiales de recubrimiento, los suelos tienden a alcanzar un alto contenido de sulfatos correspondientes a las categorías moderadas y severas (ver tabla 7), según el Reglamento Nacional de Edificaciones. La norma indica el empleo de cementos tipo V para condiciones severas y tipo IP para condiciones moderadas. Sin embargo, si bien es una medida de protección para una de las caras del concreto, es importante tener en cuenta que la otra cara del concreto debe ser resistente a la lixiviación, por lo que en vista de que el primero de ellos es más propenso a ser lixiviado, la mejor opción para ambas condiciones sería el cemento tipo IP. Otra alternativa podría ser comparar el nivel de daño que genera las sales de los suelos en comparación con el poder de lixiviación del agua y escoger en base al caso más crítico.

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10 g/L

En la tabla 37, se puede observar que las muestras alcanzan su mayor pérdida de iones calcio al inicio de la exposición durante las dos primeras semanas y, posteriormente, las pérdidas semanales fueron similares. De los tres diseños las muestras tuvieron diferencias despreciables para la cantidad de pérdida alcanzaban quincenalmente. Los gráficos 13 y 14 muestran los valores acumulados en el tiempo.

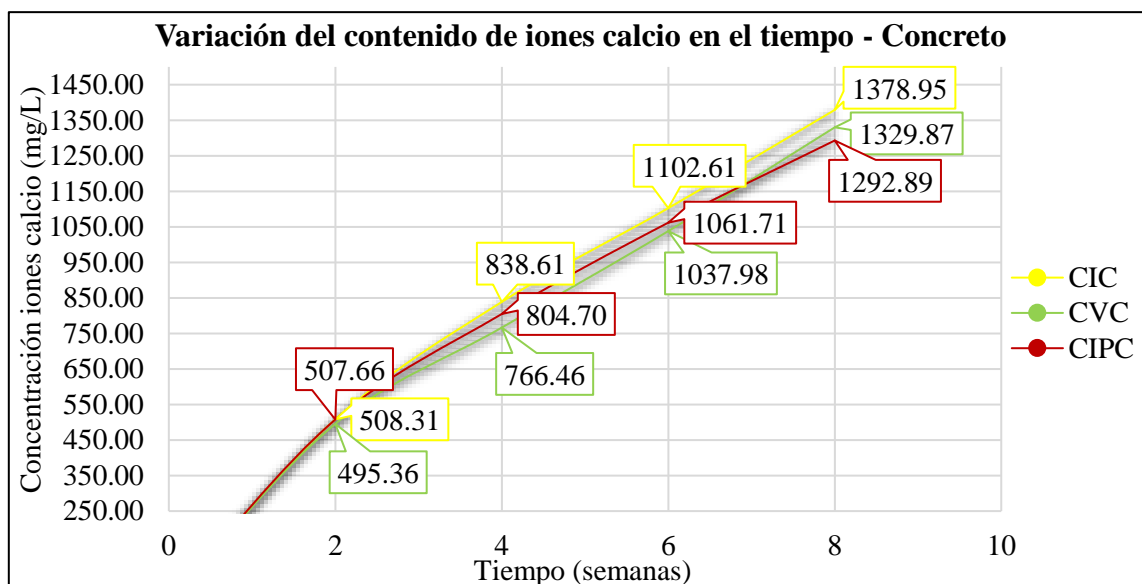


Gráfico 13: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para concreto. Fuente: propia.

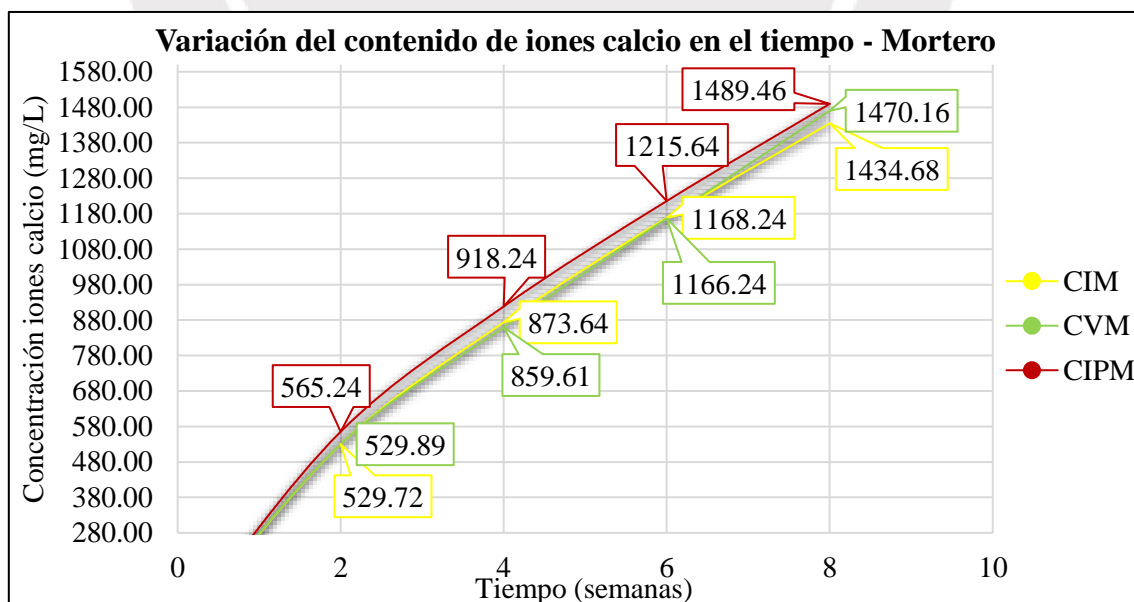


Gráfico 14: Contenido de iones calcio acumulado en el tiempo para mortero. Fuente: propia

El gráfico 13 también muestra diferencias mínimas en la pérdida acumulada, en función de la cantidad de iones disueltos se encontró lo siguiente: $CIC > CVC > CIPC$.

Por otro lado, para los morteros, los resultados eran diferentes: $CIPM > CVM > CIM$. Es decir, las probetas de CIP muestran el mejor comportamiento en concreto, pero el peor en mortero; las probetas de CV muestran un comportamiento intermedio en ambos casos, mientras que las CI muestran el comportamiento inverso al de las probetas CIP. Por lo que se reitera la importancia de encontrar una metodología que emplee ensayos comparativos entre muestras de concreto. Sin embargo, dicho resultado se puede tener en cuenta cuando se encuentren mezclas pobres en árido grueso.

La evaluación de la determinación del contenido de iones calcio disueltos indica que puede ser un criterio de valoración del deterioro válido para concreto o mortero de los tres diseños en ácido sulfúrico pues refleja netamente la pérdida del calcio de la pasta de cemento independiente de la distribución del agregado.

Como se mencionó anteriormente, si bien es sabido que el concreto en contacto con ácido sulfúrico será afectado, la prueba se realizó para cuantificar el daño para cuando los revestimientos empleados no cumplan su función. Por tanto, en base a la información recopilada las 2 primeras semanas (tiempo asumido típico para el cambio de solución en las pozas de relaves), se estima que la velocidad de lixiviación de calcio por día es:

Tabla 41: Velocidad de lixiviación referencial en solución de ácido sulfúrico 10 g/l durante las dos primeras semanas. Fuente: propia.

Velocidad de lixiviación en la semana t (mg/día)						
Tiempo "t" (semanas)	CIC	CVC	CIPC	CIM	CVM	CIPM
2	725.5	707.0	724.6	756.1	756.3	806.8
4	471.9	387.3	424.3	491.3	471.0	504.3
6	282.9	290.9	275.4	315.6	328.5	318.6
8	296.1	312.7	247.7	285.5	325.6	293.4

Para el caso de estudio, se encontró que, a las 2 semanas, el cemento tipo V tiene una ligera menor velocidad de deterioro respecto a los demás. Ello, probablemente, debido al bajo porcentaje de C3A que reacciona con los sulfatos y ocasionan el descascaramiento del concreto, cuyas partículas como producto incrementan la concentración de calcio en el medio acuoso. Por otro lado, para casos a largo plazo, se observa como la velocidad de

deterioro en los diseños CV es mayor respecto a los otros, por ello, no se deduce sea la mejor alternativa en ese escenario. Respecto a los morteros, las muestras CIM y CVM tenían velocidades similares y menores que las CIPM.

Numerosas investigaciones concluyen que los cementos IP son mejores ante condiciones de durabilidad; sin embargo, de la tabla, se puede observar esto se cumple para el concreto a largo plazo y no a corto plazo tal como se necesita para la condición propuesta. Además, si bien la norma E.060 te especifica un determinado tipo de cemento para distintas concentraciones de sulfatos, estos resultados muestran que la diferencia es mínima entre los cementos estudiados, por lo que se podría optar por el más económico, tener similar performance.

6.9 Evaluación de la variación del pH

Se resume el análisis del grado de deterioro inicial y a largo plazo de las muestras para cada solución según las mediciones de pH:

a) Medio de ensayo: Agua destilada

Los silicatos de calcio, C3S y C2S, al reaccionar con agua se convierten en silicato de calcio hidratado o tobermorita gel y en hidróxido de calcio o portlandita (Giraldo y Tobón, 2005).

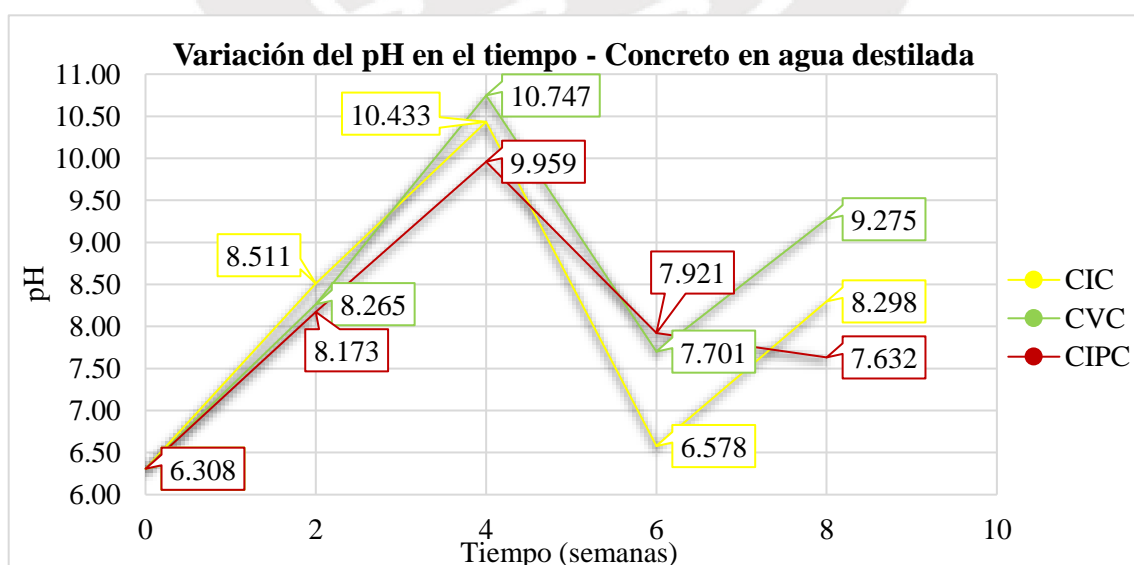


Gráfico 15: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de concreto en agua destilada. Fuente: propia.

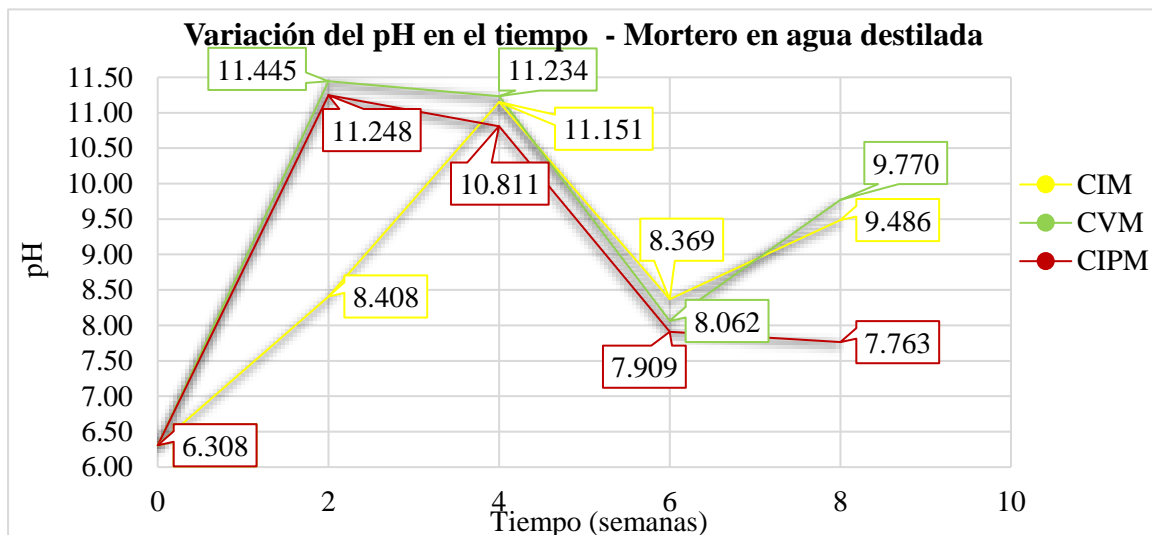


Gráfico 16: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de mortero en agua destilada. Fuente: propia.

La portlandita influye positivamente debido a que mantienen el pH entre 12 a 13 en el concreto o mortero y, a causa de esa alcalinidad, se puede proteger al acero contra la corrosión (Giraldo y Tobón, 2005). Por tanto, debido a que los productos silicatos hidratados del concreto están disueltos en agua a causa de la lixiviación del material, se deduce puedan formar nuevamente hidróxido de calcio que proporcione cierta alcalinidad o aumento de pH en la solución, lo cual se refleja en los gráficos 15 y 16.

Los valores de los gráficos son los registrados antes del cambio de solución y cada dos semanas el pH de la nueva agua destilada tenía un valor inicial promedio de alrededor de 6.308. Se podría decir que la alcalinidad del concreto incrementó el pH de la solución a causa de las partículas lixiviadas. Es decir, mayor capacidad de lixiviación de muestras a mayor pH. La variación del pH fue mayor a las 2 primeras semanas para las muestras de mortero, mientras que para las de concreto fue a las 4 semanas, siendo los valores más altos registrados para los morteros. Es decir, la velocidad de deterioro inicial fue mayor y ello se comprobó al observar la cantidad de partículas suspendidas en la solución, así como en el cálculo de velocidades para iones calcio disueltos mostrados en la tabla 40.

Aproximadamente, en la mayoría de registros para concreto y mortero, se encontró lo siguiente respecto al pH del agua destilada que constituye el medio de ensayo: $CV >$

CI > CIP. Por tanto, los medios, como indicadores de lixiviación del material, revelaron como mejor comportamiento a las muestras CIP (menores valores de pH) y lo correspondiente a los especímenes CV como el peor (mayores valores de pH). Además, la diferencia entre resultados fue más notoria para las muestras de mortero pues ello se comprobaba al observar una coloración blanquecina del medio con mayor intensidad.

Los resultados en el medio de los discos con el diseño con cemento tipo I, fueron muy variables, pues alcanzaba los mayores valores y en una ocasión el menor valor que luego fue recuperado. Sin embargo, a pesar de su comportamiento, en promedio se podría considerar una opción intermedia. Por tanto, el pH puede ser un criterio de valoración del deterioro válido para concreto o mortero.

El aumento del pH del medio en contacto con los especímenes según el diseño podría tener relación con su composición, la cual fue obtenida del informe de calidad del proveedor. Por un lado, los componentes C3S y C2S del cemento tipo V comprendieron un porcentaje igual a 56.10% y 19.91% respectivamente. Por otro lado, el cemento tipo I estuvo compuesto por 55.8% de C3S y 17.01% de C2S. Por tanto, se encuentra una relación entre la cantidad de % de silicatos cálcicos y el mayor incremento del pH del medio de ensayo de forma directamente proporcional. Además, es probable que, debido a que la ausencia de piedra en el mortero involucra mayor cantidad de pasta, si bien los % de los componentes C3S, C2S es la misma, la cantidad en peso respecto al total sea mayor y por ello esté relacionado a los más altos pH alcanzados.

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10 g/L

Se deduce que el bajo pH registrado de 0.969 fue la causa de la rápida reacción entre los discos y la solución debido a que el concreto es un material alcalino.

Algunos autores manifiestan que el grado de acidez de una sustancia como el ácido sulfúrico genera la progresiva neutralización de la alcalinidad del hormigón, lo cual también favorece la pérdida progresiva de pasividad de las armaduras (Peláez, 2006).

Algunos autores manifiestan que el grado de acidez de una sustancia como el ácido sulfúrico genera la progresiva neutralización de la alcalinidad del hormigón, lo cual también favorece la pérdida progresiva de pasividad de las armaduras (Peláez, 2006). En este caso, se observó la inmediata neutralización de la alcalinidad para las muestras estudiadas.

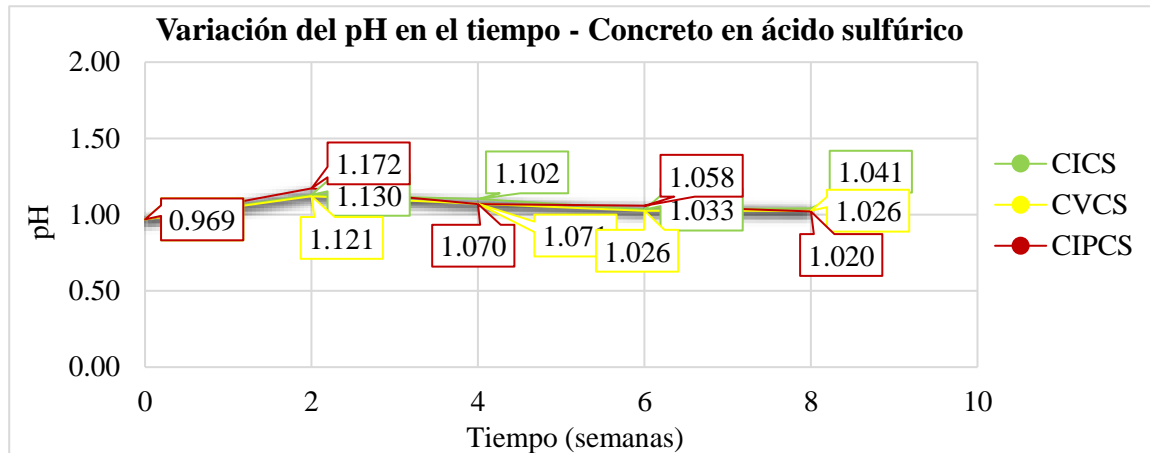


Gráfico 17: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de concreto en ácido sulfúrico. Fuente: propia.

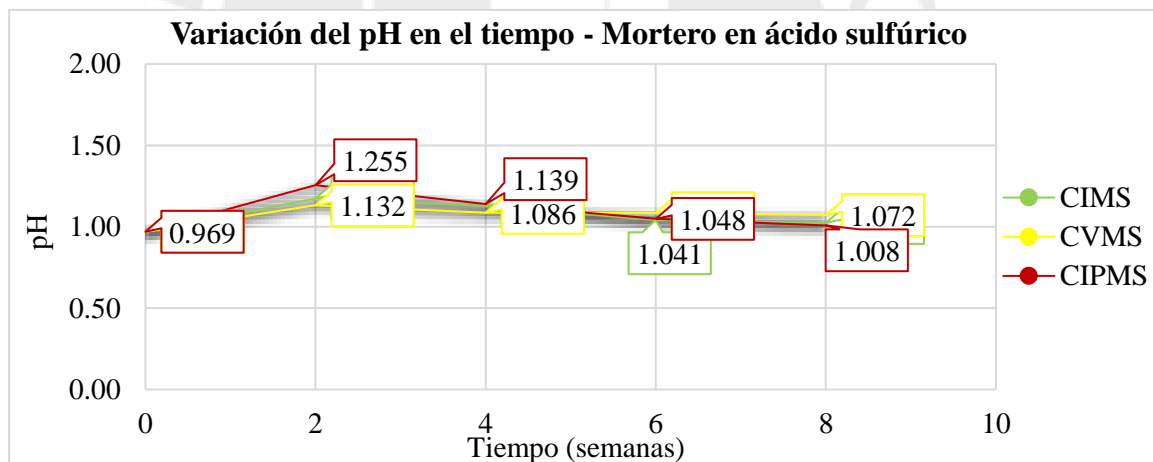


Gráfico 18: pH vs tiempo de las soluciones con muestras de mortero en ácido sulfúrico. Fuente: propia.

En esta investigación, si bien el concreto tiene un alto pH, se puede observar en los gráficos 17 y 18 que los valores no incrementaron significativamente a pesar del alto contenido de partículas de concreto/mortero encontradas en los recipientes, a diferencia de los resultados obtenidos con agua destilada. Así mismo, los valores del pH fueron similares entre cementos para las muestras de concretos y morteros, pues la diferencia radicaba en la centésima. Por tanto, es más difícil comparar el grado de deterioro de los diseños por este ensayo, ya que las diferencias son mínimas.

Además, otra de las consecuencias generadas a causa de la neutralización del pH del concreto, es que se desarrolla un proceso altamente exotérmico pues, tal como se mencionó en el ítem 6.3 b), los medios incrementaron su temperatura y empañaron los recipientes. Por tanto, el recubrimiento a elegir debería ser tal que, en caso de desarrollarse una rotura o deterioro del mismo, sus propiedades puedan ser resistentes a la temperatura que pueda alcanzar el concreto o el medio.

6.10 Evaluación de los resultados de microscopía electrónica de barrido SEM

De las imágenes obtenidas, también se encontró lo siguiente:

- Las muestras CIM0 y CVM0 presentaron fisuras no visibles al ojo humano. Según estudios, ello se debe a las reacciones exotérmicas por proceso de hidratación del material (Giraldo et. All, 2006) que a su vez está relacionado con los porcentajes de silicatos cálcicos y aluminato cálcico, este último responsable del fraguado relámpago (PCA, 2004). Debido a que los cementos tipo I tienen mayor calor de hidratación (o mayor % C3A), era de esperarse que las fisuras se presentaran en mayor cantidad y espesor, seguido por el cemento tipo V (menor % C3A). Por tanto, ambos casos tienen más probabilidad del ingreso de agentes externos que favorezcan el deterioro del concreto, siendo el primero el más propenso.
- A 28 días de curado, las réplicas “0”, se suele observar el desarrollo de la tobermorita como una matriz densa, compacta y continua (Giraldo et. All, 2006), así como algunos productos en proceso de formación. Sin embargo, ello se diferencia más en el siguiente orden: CIM0 > CVM0 > CIPM0, lo cual, al igual que el ítem anterior, puede estar relacionado a la cantidad de calor que libera cada tipo de cemento. A mayor sea el calor, mayor velocidad de hidratación y formación de fases hidratadas.
- No ha sido posible observar la puzolana o los compuestos silicatos del cemento con claridad como las figuras 14 y 15 debido a la máxima escala alcanzada con el ensayo SEM, donde la máxima amplificación fue de 5000X.

En cuanto a los medios estudiados, se tiene lo siguiente:

a) Medio de ensayo: Agua destilada

- El mecanismo de las aguas blandas, provoca la descalcificación o lixiviación de las fases hidratadas del cemento (Antón, 2016). A las 8 semanas de exposición, se encontró a los agregados en la mayor parte de la superficie y áreas reducidas de pasta de cemento hidratada. Además, la cantidad de agregado encontrada fue en el siguiente orden: CV>CI>CIP, por lo que el cemento tipo V presentó peores resultados. Ello, además, está relacionado con la cantidad de iones calcio disueltos encontrada para el agua destilada en contacto con muestras CVC y CVM.
- Estudios que emplean SEM sobre la pasta de cemento hidratada señalan la baja tasa de reacción del C2S con el agua, el cual es característico por su forma redondeada a diferencia del C3S (Giraldo et. All, 2006). Por tanto, si bien las fases hidratadas de la superficie fueron lixiviadas, en las figuras observadas, correspondientes al finalizar el periodo de lixiviación, se encontraron algunas zonas con presencia de hidratación. Ello puede estar relacionado con los resultados de pérdida de masa que indicaron que las muestras que estuvieron expuestas más tiempo al medio de estudio, tuvieron menor pérdida de masa respecto a las que estuvieron menos tiempo inmersas. Es decir, es probable la causa derive de la formación de productos hidratados (en mayor parte el C2S) de la zona interna que no culminó su proceso de hidratación y, por tanto, las muestras hayan adquirido mayor cantidad de masa en comparación a la lixiviada.

b) Medio de ensayo: Ácido sulfúrico 10 g/L

- Se encontró mayor daño en la superficie de las muestras a las 8 semanas de inmersión. Ello incluyó hasta los agregados a diferencia de lo observado con el agua destilada, pues el área de los mismos perdió la forma definida que los caracterizaba. Por tanto, el medio también influye en los agregados.
- Se pudo encontrar que la muestra con cemento tipo V mostró una ligera ventaja en su microestructura, pues aún se observan zonas uniformes (posiblemente tobermorita). En el caso de las otras muestras, todos los elementos observados eran amorfos.
- Debido a la escala, no es posible observar con claridad la formación de etringita (tamaño

inferior a 1 micra), la cual se presenta en forma de agujas normalmente. El espécimen CIM4 parece mostrar elementos de esa característica, cuya aparición sería razonable pues es producto de la hidratación del compuesto C3A, el cual se encuentra en mayor porcentaje para el cemento tipo I. Sin embargo, a investigaciones futuras podría validarse con equipos que permitan alcanzar una mayor escala.

7. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

7.1 El agua destilada, la cual tiene contenido de iones muy bajo y similar a las aguas de lluvia o de manantial, ha mostrado ser corrosiva para todas las mezclas de cemento estudiadas. Las morfologías de ataque sobre el concreto/mortero incluyen el desmoronamiento debido a la lixiviación de la pasta de cemento, lo cual es reflejado en la primera parte del proceso. Con en el transcurso del tiempo, puede no ser notorio a simple vista pues los iones calcio disueltos son incoloros.

7.2 Las probetas (de concreto y de mortero) de los tres diseños mostraron la misma tendencia de lixiviación en agua destilada para un tiempo de exposición de 8 semanas, pero en diferente magnitud en función de la cantidad de iones disueltos: $CV > CI > CIP$. Esto puede deberse al porcentaje de componentes silicatos-cálcicos respecto al peso de cada tipo de cemento, siendo el cemento tipo V el de mayor %, por tanto, produjo mayor cantidad de iones calcio disueltos. Estos resultados fueron comprobados con el análisis del pH, donde también se encontró una relación entre la cantidad de % de silicatos cálcicos y el mayor incremento del pH del medio de ensayo de forma directamente proporcional.

En el caso de los morteros, debido a que la ausencia de piedra, si bien los % de los componentes C3S y C2S es la misma, la cantidad en peso respecto al total es mayor y por ello se encuentra una relación a los más altos pH alcanzados.

7.3 Los resultados de los ensayos corresponden a condiciones estáticas (sin movimiento de las probetas, ni del medio de ensayo). Bajo estas condiciones la pasta deteriorada se mantiene en el espécimen y el líquido debe atravesarla. La erosión, en cambio, contribuye retirando el

material deteriorado, lo cual permite el contacto más rápido de los agentes agresivos y, por tanto, es de suponer que en condiciones de flujo la velocidad y la magnitud del deterioro puede ser mayor. Es decir, estudios que permitan implementar esta segunda condición podrían producir información más cercana a las condiciones reales para estructuras convencionales, como canaletas de lluvias.

Si bien durante la inspección visual no se registraron cambios notorios a simple vista como respuesta a la corrosividad del agua destilada, los ensayos realizados en este estudio corroboraron que se estaba produciendo una pérdida de masa e iones calcio. Esto demuestra que una estructura en contacto con aguas con muy bajo contenido de sales puede parecer en buen estado durante su uso, pero en realidad puede estar perdiendo resistencia por lixiviación de la pasta de cemento.

- 7.4 El ácido sulfúrico a una concentración de 10 g/L es muy corrosivo, tanto para el mortero como el concreto, con cambios de manera inmediata para los tres diseños de estudio. La corrosividad de este ácido era conocida, pero fueron obtenidas evidencias experimentales de la velocidad y de la morfología del ataque. Las probetas para los tres diseños mostraron la misma tendencia de comportamiento en ácido sulfúrico para un tiempo de exposición de 2 semanas, pero en similar magnitud en función de la cantidad de iones disueltos: $CV \approx CI \approx CIP$ y los resultados fueron corroborados con el registro del pH del medio. Es decir, este tipo de ataque químico tendrá similares resultados independientemente del tipo de cemento a emplear, en caso de que un recubrimiento que haya sido colocado para proteger el concreto presente algún tipo de daño y permita el contacto medio ácido/concreto.
- 7.5 El ataque por ácido sulfúrico 10 g/L sucedió inmediatamente después de poner en contacto las probetas superando en promedio una velocidad de incremento de iones calcio disueltos de 700 mg/L al día durante las dos primeras semanas; sin embargo, posterior a ello, el grado de deterioro fue menor. Ello, probablemente, porque el diferencial del pH entre las muestras y el medio de estudio era mayor al inicio que en las semanas siguientes.
- 7.6 Entre los cambios observados correspondientes al medio de estudio de ácido sulfúrico, por un lado, se encontró una reacción altamente exotérmica debido a la neutralización de los

iones calcio hidroxilo que confieren la alcalinidad del concreto, a causa del ácido. Por otro lado, esta interacción también ocasionó el desmoronamiento progresivo del concreto, por lo que la integridad de cualquier recubrimiento de protección orgánico o polimérico podría verse también afectada. Finalmente, también se observaron cambios como como la formación de productos viscosos a causa de hidróxido de calcio o una coloración rojiza debido al contenido de hierro del cemento.

7.7 La pérdida de masa es un criterio de valoración para estudios de laboratorio acerca de la corrosividad de diversos medios frente a diferentes mezclas de concreto o mortero; sin embargo, debe definirse qué tipo de medio. Por ejemplo, en este caso, en ácido sulfúrico 10 g/L los agregados de las muestras también son atacados, de manera que la pérdida de masa puede resultar variable para realizar comparaciones.

7.8 Futuros estudios podrían considerar otras concentraciones de ácido sulfúrico para estudiar efectos como la hinchazón del material debido a la formación de sulfoaluminatos cálcicos.

7.9 Al igual que los ensayos realizados con agua destilada, los correspondientes al ácido sulfúrico 10 g/L fueron realizados bajo condiciones estáticas. En el caso de las pozas de lixiviación de minerales, el medio es dinámico, por lo también es de suponer que en condiciones de flujo la velocidad y la magnitud del deterioro pueden ser mayor debido al incremento de la erosión.

7.10 Como se mencionó la norma E.060 presenta unos requisitos referidos al tipo de cemento a emplear según las condiciones de exposición del concreto frente a concentraciones de ácido sulfúrico mostrados en la tabla 7. Sin embargo, en las condiciones de estudio mencionadas, no se encontró diferencias notorias entre los resultados de las muestras con distintos tipos de cemento para concreto simple con una relación $w/c = 0.5$ cuando las estructuras están expuestas a ácido sulfúrico 10 g/L. Por tanto, se podría cuestionar que dichos requisitos sean realmente relevantes ante estas condiciones.

7.11 No siempre se cumple que los ensayos comparativos para diseños de concreto representan un resultado similar a los diseños de mortero, pues algunos resultados suelen ser distintos para ambos casos. Ante ello, se debe proponer una mejor alternativa para realizar los ensayos

más representativos para el concreto y no basarse únicamente en normas que comparan diseños de morteros como la ASTM C452 y C1012.

7.12 Las guías o métodos de diseño de concreto, como la guía para el proporcionamiento de mezclas de concreto normal ACI 211.1S-91, deben ser validadas en campo, de tal manera que las características finales del material permitan su colocación sin originar patologías. Además, las resistencias que muestran dichas metodologías son referenciales y no contemplan el uso de aditivos, por lo que podrían variar de acuerdo a la composición de los materiales empleados.

7.13 Comparaciones de resultados entre las muestras de concreto y mortero pueden emplearse como referencia sobre el comportamiento entre un concreto bien diseñado y uno pobre en áridos gruesos.

7.14 Los ensayos empleados tienen una finalidad comparativa, mas no representa que el desarrollo del deterioro pueda ser de la misma forma por factores como la diferencia en tamaños de estructura o las condiciones de ataque (medios estáticos o dinámicos). Sin embargo, podría emplearse como referencia para establecer los criterios a tener en cuenta para realizar los ensayos debido a las posibles reacciones que puedan suceder.

7.15 Debido a que en este trabajo se ha propuesto un diseño de estudio en específico sometido a dos medios de ensayos, las conclusiones quedan limitadas a este tipo de condiciones.

7.16 Sería de gran ayuda desarrollar una metodología que se pueda emplear para determinar resultados de la pérdida de resistencia a compresión de las muestras de concreto empleadas aun cuando el espécimen ya haya desarrollado un porcentaje de lixiviación.

7.17 El país está limitado en cuanto a la investigación de los nuevos materiales a emplear debido a la baja disponibilidad de estos, por ejemplo, adiciones minerales como escoria de alto horno, humo de sílice, cenizas volantes, fibra de vidrio, etc. Normalmente, este tipo de ensayos comparativos se realizan fuera del país para diseños de mezcla con cementos adicionados para garantizar una mejor performance que los materiales convencionales; sin embargo, las características de los materiales foráneos pueden no desarrollar las mismas ventajas que los que se tienen en Perú en base a la composición química de los mismos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Al 2019, Perú tendrá 15 proyectos mineros en construcción y producción, (2017). *América Economía*. Recuperado de: <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/al-2019-peru-tendra-15-proyectos-mineros-en-construccion-y-produccion>
- Andrade, C., & Macías, A. (1981). Influencia del contenido en álcalis de los cementos sobre la corrosión de armaduras galvanizadas.
- Aumenta dependencia de ácido sulfúrico de Perú para minería (2011). *InfoMine Inteligencia y Tecnología Minera*. Recuperado de: <http://noticiasmineras.mining.com/2011/08/03/aumenta-dependencia-de-acido-sulfurico-de-peru-para-mineria/>
- Avendaño, E. (2006). Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial. *San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica*.
- Bapat, J. D. (2012). *Mineral admixtures in cement and concrete*. CRC Press.
- Barbudo, M. A. S., & Borges, P. C. (2001). *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).
- Castro, G. V., Vasquez, M. C., & Guarniz, W. G. (2011). Vida Útil en Estructuras de Concreto Armado Desde el Punto de Vista de Comportamiento del Material. *Ingeniería de estructuras*, 16(2), 151-172
- Cuellar Loaiza, J. C., & Sequeiros Arone, W. (2017). Influencia del curado en la resistencia a la compresión del concreto preparado con cemento portland tipo I y cemento puzolánico tipo IP en la ciudad de Abancay–Apurímac.
- De Belie, N. (2007). Evaluation of methods for testing concrete degradation in aggressive solutions. In *Workshop on Performance of Cement-based Materials in Aggressive Aqueous Environments-Characterisation, Modelling, Test Methods and Engineering Aspects* (pp. 79-90).
- Despacho nacional de cemento sigue en racha positiva y crece 4.1% en noviembre. *GESTIÓN*. Recuperado de: <https://gestion.pe/economia/mercados/despacho-nacional-cemento-sigue-racha-positiva-crece-4-1-noviembre-253808-noticia/>
- Elizondo-Valverde, G. O. (2013). Resistencia vs. relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP-AR).
- Ekström, T. (2001). Leaching of concrete : experiments and modelling. Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- Ghrichi, M., Kenai, S., & Meziane, E. (2006). Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *Journal of Materials Science*, 41(21), 6965-6972
- Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso

de hidratación. *Dyna*, 73(148), 69-81.

Girardi, F., Vaona, W., & Di Maggio, R. (2010). Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 595-602.

González, Javier (2008). Caracterización de materiales. Práctica 4: Difracción de Rayos X. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.

Huamanga preparada para enfrentar lluvias con Sistema de drenaje pluvial, (2017, 29 de marzo). *RPP NOTICIAS*. Recuperado de: <http://rpp.pe/peru/ayacucho/sistema-de-drenaje-pluvial-evita-inundaciones-en-huamanga-noticia-1040294>.

Hernández-Castañeda, O., & Mendoza Escobedo, C. J. (2006). Durabilidad e Infraestructura: Retos e Impacto Socioeconómico, INGENIRÍA Investigación y Tecnología VII 1, 57-70 Universidad Autónoma de México, Distrito Federal.

Hilsdorf, H., & Kropp, J. (2014). *Performance criteria for concrete durability*. CRC Press.

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) (Junio, 2003). Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes – Aguas y sedimentos.

Instituto Europeo del Cobre – Copper Alliance. “Procesos de producción”. Madrid, España (2018). Recuperado de: <https://copperalliance.es/cobre/cobre-y-sus-aleaciones/procesos/>.

Jain, J., & Neithalath, N. (2009). Analysis of calcium leaching behavior of plain and modified cement pastes in pure water. *Cement and Concrete Composites*, 31(3), 176-185.

Kelsey Cris. Geosynthetica. “Geomembranas in Mining: the state of the research” Kingston, Canada. (Noviembre, 2014) Recuperado de: <https://www.geosynthetica.net/interview-fady-abdelaal-geomembranes-in-mining/>

Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Springer Science & Business.

Ludwig Udo (1974). Sobre el fraguado y endurecimiento de cementos. *Materiales de Construcción Vol. 22*, 85-92.

Malos olores en drenaje pluvial son por conexión de desagüe. (2015) *Diario judicial*. Recuperado de: <http://www.jornada.com.pe/local/9251-malos-olores-en-drenaje-pluvial-son-por-conexion-de-desagueue>.

Makhloufi, Z., Bouziani, T., Hadjoudja, M., & Bederina, M. (2014). Durability of limestone mortars based on quaternary binders subjected to sulfuric acid using drying–immersion cycles. *Construction and Building Materials*, 71, 579-588.

Mehta, P. K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete international*, 24(7), 23-28.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete microstructure, properties and materials*.

Minem: Casi el 10% del PBI y el 61% de las exportaciones del 2018 fueron producto de la minería. *Plataforma Digital única del Estado Peruano*. Recuperado de: <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/29754-minem-casi-el-10-del-pbi-y-el-61-de-las-exportaciones-del-2018-fueron-producto-de-la-mineria>

Muñoz, A. (1999). Ingeniería sismorresistente. *Pontificia Universidad Católica del Perú-Facultad de Ciencias de la Ingeniería*, 1.

Mendez, Ángeles (2011). El Cemento. Recuperado de: <https://quimica.laguia2000.com/reacciones-quimicas/el-cemento>.

Ottazzi Pasino, G. (2017). Apuntes del curso concreto armado 1. *Lima-Perú: Fondo Editorial PUCP*.

Diseño, P. C. A. (2004). Control de Mezclas de Concreto. *Steven H. Kostmatka*.

Plonsky, Brian (2015). Rayos X para la industria: los ensayos destructivos contribuyen a aumentar la competitividad de Malasia. *Reforzamiento de la seguridad y calidad*. Agencia Internacional Atómica de Energía.

¿Por qué es tan importante la minería para el Perú, (2015, 15 de junio)? *El Comercio*. Recuperado de: <https://elcomercio.pe/economia/peru/importante-mineria-peru-192754>.

Powers, T. C., and Brownyard, T. L. (1946, September). "Permeability of Portland cement paste". In *Journal of the American Concrete Institute*, 51 (pp. 285-298).

Puertas, F., & Palomo, Á. (1991). Interface Microstructures in Concrete. *Materiales de Construcción*, 41(221), 91-106.

Reglamento Nacional de Construcciones. Norma Técnica de Edificaciones E-060 Diseño en Concreto Armado, 2009

Reglamento Nacional de Construcciones. Norma Técnica de Edificaciones E-030 Diseño Sismorresistente, 2018

Realizan trabajos de drenaje en la plaza de armas de Piura, (2017, 28 de marzo). *RPP NOTICIAS*. Recuperado de: <http://rpp.pe/peru/piura/fotos-realizan-trabajos-de-drenaje-en-la-plaza-de-armas-de-piura-noticia-1040020>

Reportaje: ¿Cuáles han sido las consecuencias de desborde del Río Piura (2017, 31 de marzo). *RPP NOTICIAS*. Recuperado de: <http://rpp.pe/blog/mongabay/reportaje-cuales-han-sido-las-consecuencias-de-desborde-del-rio-piura-noticia-1040451>.

Rivva, E. (2000). Naturaleza y materiales del concreto. In *II Congreso Nacional de Estructuras y Construcción, Capítulo Peruano del ACI, Capítulo* (pp. 21-25)

Romero Quintero & Hernández Rico (2014). Diseño de mezclas de hormigón por el método ACI y efectos de la adición de cenizas volantes de termotasajero en la resistencia a la compresión. Universidad Santo Tomás. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/915/Diseno%20de%20mezclas%20de%20hormigon%20por%20el%20metodo%20a.c.i..pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., & Hossain, K. M. A. (2016). Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 113, 163-173.

SINTEMAR (2018). Reparación y protección de cubeto de contención de ácido sulfúrico. Bilbao-España. Recuperado de: <http://www.sintemar.com/es/repuracion-y-proteccion-de-cubeto-de-contencion-de-acido-sulfurico>

Suero Iquiapaza, Policarpo Agaton (2012). Optimización técnica y económica de la obtención del cemento de cobre a nivel de planta piloto. Universidad Nacional del Callao.

Swapp Susan (2017). Scanning Electron Microscopy (SEM). Universidad de Wyoming. Recuperado de: https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html

The Concrete producer. (2017). La producción del concreto premezclado en el 2017 es dos veces más grande que en el 2016. Recuperado de:

http://www.theconcreteproducer.com/business/2017-ready-mix-production-is-2-higher-than-2016_o

The Statics Portal (2017). Major countries in worldwide cement production from 2012 to 2017 (in million metric tons). Recuperado de: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>

Torras, A. V. (1988). Observación microscópica del clinker de cemento portland. *Materiales de Construcción*, 14(113), 23-30.

Torres Acosta, A., & Martínez Madrid, M. (2001). Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. *Publicación Técnica*, (181).

Torres Acosta. (2010). Durabilidad del concreto expuesto a ambiente marino. Parte I: Periodo de la iniciación de la corrosión (T1). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

Uller, L. (2008). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Jorge Sarmiento.

911 Metallurgist (2016). Lixiviación del cobre en tanques. Recuperado de: <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/lixiviacion-cobre-tanques/#QUIMICA-DE-LA-LIXIVIACION>

ANEXO N°1: FORMATOS DE DISEÑOS DE MEZCLA



FORMATOS DE ENSAYOS DE TESIS

Solicitante : TESIS María Elena Ahumada Ponce
TESIS : Evaluación de tres tipos de cemento para la fabricación de concreto frente a ataque químico por aguas puras y ácido sulfúrico
PROCEDENCIA : MEZCLA OFICIAL DISEÑO 1- CEMENTO TIPO I
Ensayo : DOSIFICACION OFICIAL DISEÑO CON CEMENTO TIPO I
Exp. N° :
Fecha : 24/07/18

DOSIFICACION DE MEZCLAS DE CONCRETO ACI

	Marca	Pe		slump	6-7pulg
Cemento	Andino	3,140			
				Peso Unitario Seco	Pe
	TM	Wa	wo	Varillado	Suelto
Arena	-	1.39	5.91	1,618	1,494
Piedra	3/4"	0.75	1.19	1,665	1,520
					2734

Características de la mezcla de concreto:

Resistencia a compresión: f'c(kg/cm2)	
Resistencia Media Requerida: f'cr (kg/cm2)	
Revenimiento (cm)	6-7pulg
Agua/Cemento: w/c	0.5
Arena/agregado: a/A (en volumen)	0.79
Aditivo/cemento: ad/c (en peso)	7.5%

Dosificación para 1m3 de mezcla

Corrección por humedad.

	MEZCLA OFICIAL - D1	CORR. POR PESO UNIT	MEZCLA OFICIAL - D1
a/A	0.78960014	Factor	a g
w/c	0.5	1.04603	Corrección (wa) 796.48 1,034.90
Agua (*)	206.00 0.206	215.00	Corrección (wo) 831.99 1,039.42
0.5 Cemento	412.00 0.131	431.00	-35.51 -4.52
Aire	0.020	-	agua cedida/captada -40.03
Grava	982.00 0.359	1,027.20	
Arena	751.00 0.284	785.56	
Aditivo (ml)	3,090.00 -	3,232.22	
	2,351.00 1.00		

Dosificación corregida por humedad

Vol. Prueba 0.088

Material	MEZCLA OFICIAL - D1
Agua	15
Cemento	38
Aire	-
Grava	91
Arena	73
Aditivo	284
TOTAL	502 m3

FORMATOS DE ENSAYOS DE TESIS

Solicitante : TESIS María Elena Ahumada Ponce
TESIS : Evaluación de tres tipos de cemento para la fabricación de concreto frente a ataque químico por aguas puras y ácido sulfúrico
PROCEDENCIA : MEZCLA DE OFICIAL 2 DISEÑO 2- CEMENTO TIPO V
Ensayo : DOSIFICACION OFICIAL 2 DISEÑO CON CEMENTO TIPO V
Exp. N° :
Fecha : 31/07/18

DOSIFICACION DE MEZCLAS DE CONCRETO ACI

	Marca	Pe		slump	6-7pulg
Cemento	Andino	3,180			
	TM	Wa	wo	Peso Unitario Seco	Pe
				Varillado	Suelto
Arena	-	1.39	5.18	1,618	1,494
Piedra	3/4"	0.75	2.71	1,665	1,520
					2734

Características de la mezcla de concreto:

Resistencia a compresión: f'c(kg/cm2)	
Resistencia Media Requerida: f'cr (kg/cm2)	
Revenimiento (cm)	6-7pulg
Agua/Cemento: w/c	0.5
Arena/agregado: a/A (en volumen)	0.79
Aditivo/cemento: ad/c (en peso)	7.5%

Dosificación para 1m3 de mezcla

	MEZCLA OFICIAL - D2	CORR. POR PESO UNIT	CORR. POR SLUMP
a/A	0.79419516	Factor	Factor
w/c	0.5	1.03842	Agua - 8litros
Agua (*)	206.00	213.91	206.00
Cemento	412.00	427.83	412.00
Aire	0.020	-	0.02
Grava	982.00	1,019.73	1,019.73
Arena	755.00	784.01	754.91
Aditivo (ml)	3,090.00	3,208.72	3,090.00
	2,355.00	1.00	2,392.64

Dosificación corregida por humedad

Vol. Prueba 0.088

Corrección por humedad.

MEZCLA OFICIAL - D2	a	g
Corrección (wa)	765.40	1,027.38
Corrección (wo)	794.01	1,047.36
	-28.61	-19.99
agua cedida/captada	-48.60	

Material	MEZCLA OFICIAL - D2
Agua	15
Cemento	36
Aire	-
Grava	92
Arena	70
Aditivo	272
TOTAL	213

FORMATOS DE ENSAYOS DE TESIS

Solicitante : TESIS María Elena Ahumada Ponce

TESIS : Evaluación de tres tipos de cemento para la fabricación de concreto frente a ataque químico por aguas puras y ácido sulfúrico

PROCEDENCIA : MEZCLA DE OFICIAL 3 DISEÑO 3- CEMENTO TIPO IP

Ensayo : DOSIFICACION OFICIAL 3 DISEÑO CON CEMENTO TIPO IP

Exp. N° :

Fecha : 01/08/18

DOSIFICACION DE MEZCLAS DE CONCRETO ACI

	Marca	Pe		slump	6-7pulg
Cemento	Andino	3,030			
				Peso Unitario Seco	Pe
	TM	Wa	wo	Varillado	Suelto
Arena	-	1.39	5.44	1,618	1,494
Piedra	3/4"	0.75	2.71	1,665	1,520
					2647
					2734

Características de la mezcla de concreto:

Resistencia a compresión: f'c(kg/cm2)	
Resistencia Media Requerida: f'cr (kg/cm2)	
Revenimiento (cm)	6-7pulg
Agua/Cemento: w/c	0.5
Arena/agregado: a/A (en volumen)	0.78
Aditivo/cemento: ad/c (en peso)	11.0%

Dosificación para 1m3 de mezcla

Correccion por humedad.

	MEZCLA OFICIAL - D3	CORR. POR PESO UNIT	MEZCLA OFICIAL - D3
a/A	0.77633827	Factor	
w/c	0.5	1.04712	Correccion (wa)
Agua (*)	206.00	215.00	Correccion (wo)
Cemento	412.00	431.00	-31.26
Aire	0.020	-	-20.13
Grava	982.00	1,027.20	agua cedida/captada
Arena	738.00	771.97	-51.40
Aditivo (ml)	4,532.00	4,740.59	
	2,338.00	1.00	

Dosificación corregida por humedad

Vol. Prueba

0.088

Material	MEZCLA OFICIAL - D3
Agua	14.397
Cemento	37.928
Aire	-
Grava	92.843
Arena	71.629
Aditivo	417.208
TOTAL	216.797

m3

ANEXO N°2: ENSAYOS DE CALIDAD DEL CEMENTO



INFORME DE CALIDAD

MARCA: Andino Tipo I
TIPO DE CEMENTO: Portland Tipo I
ESPECIFICACIÓN VIGENTE: ASTM C-150
NTP 334.009

Fecha:

2da. Quincena Setiembre 2018

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

PRUEBAS FÍSICAS:	Result. Ensayo	Spec. Limite	ANÁLISIS QUÍMICO:	Result. Ensayo	Spec. Limite
1) Superficie específica (BLAINE)	cm ² /gr.	3680	2800 Mín.	1) Pérdida por Ignición.	1.44 % 3.00 Máx.
2) Tiempo de fraguado (VICAT)	Minutos			2) Residuo Insoluble	0.71 % 0.75 Máx.
	INICIAL	102	45 Mín.	3) Dióxido de silicio (SiO ₂)	20.61 % ---
	FINAL	283	375 Máx.	4) Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	4.81 % ---
3) Expansión Autoclave	%	-0.04	0.8 Máx.	5) Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	3.41 % ---
4) Contenido de Aire, en volumen	%	5.08	12 Máx.	6) Óxido de Calcio (CaO)	64.17 % ---
				7) Óxido de Magnesio (MgO)	1.83 % 6.0 Max.
				8) Cal libre	1.01 % ---
				9) Trióxido de Azufre (SO ₃)	2.63 % 3.0 Máx.
				10) Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.06 % ---
				11) Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.63 % ---
5) Resistencia a la compresión	Mpa	(lb/pulg ²)	Mpa	<u>FASES MINERALÓGICAS SEGÚN BOGUE</u>	
a 3 Dias	24.97	3630	12.0 Mín.	SILICATO TRICÁLCICO (C ₃ S)	55.81 % ---
a 7 Dias	31.02	4510	19.0 Mín.	SILICATO DICÁLCICO (C ₂ S)	17.01 % ---
a 28 Dias	* 42.16	* 6130	---	ALUMINATO TRICÁLCICO (C ₃ A)	6.96 % ---
6) Densidad	(gr/cm ³)	3.15		FERROALUMINATO TETRACÁLCICO (C ₄ AF)	10.38 % ---

REQUISITOS OPCIONALES

7) Falso Fraguado, penetración final	%	90.00	50 Min.	<u>ALCALIS EQUIVALENTES</u>	0.48 % 0.60 Máx.
8) Resistencia a sulfatos					
Expansión a 180 días	%	0.083	0.1 Max.	Calor de Hidratación a 7 días	68.18 Cal/g
				Calor de Hidratación a 28 días	77.08 Cal/g

* Corresponde a 2da. Quincena Agosto 2018

INFORME DE CALIDAD

MARCA **Andino Tipo V**

TIPO DE CEMENTO: **Portland Tipo V**

Fecha:

ESPECIFICACIÓN VIGENTE: **ASTM C-150
NTP 334.009**
2da. Quincena Setiembre 2018
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

PRUEBAS FÍSICAS:	Result. Ensayo	Spec. Limite	ANÁLISIS QUÍMICO:	Result. Ensayo	Spec. Limite
1) Superficie específica (BLAINE)			1) Pérdida por Ignición.	1.28	% 3.00 Máx
	cm2/gr.	3450 2800 Mín	2) Residuo Insoluble	0.61	% 0.75 Máx.
2) Tiempo de fraguado (VICAT)			3) Dióxido de silicio (SiO ₂)	21.70	% ---
	Minutos		4) Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	3.74	% ---
	INICIAL	136 45 Mín	5) Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	4.83	% ---
	FINAL	305 375 Máx	6) Óxido de Calcio (CaO)	64.29	% ---
3) Expansión Autoclave			7) Óxido de Magnesio (MgO)	1.44	% 6.0 Max.
	%	0.00 0.8 Máx	8) Cal libre	0.78	% ---
4) Contenido de Aire, en volumen			9) Trióxido de Azufre (SO ₃)	1.94	% 2.30 Máx.
	%	5.1 12.0 Máx	10) Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.06	% ---
			11) Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.50	% ---
5) Resistencia a la compresión			FASES MINERALÓGICAS SEGÚN BOGUE		
	<u>Mpa</u>	(lb/pulg ²) Mpa	SILICATO TRICÁLCICO (C ₃ S)	56.10	% ---
a 3 Días	20.36	2960 8 Mín	SILICATO DICÁLCICO (C ₂ S)	19.91	% ---
a 7 Días	25.58	3720 15 Mín	ALUMINATO TRICÁLCICO (C ₃ A)	1.74	% 5.0 Máx
a 28 Días	* 38.10	* 5540 21 Mín	FERROALUMINATO TETRACÁLCICO (C ₄ AF)	14.67	% ---
6) Densidad					
	(gr/cm ³)	3.15 --			

REQUISITOS OPCIONALES

7) Falso Fraguado, penetración final	%	90.00	50 Mín	<u>ALCALIS EQUIVALENTES</u>	0.39	% 0.60 Máx.
8) Resistencia a sulfatos						
Expansión a 180 días	%	0.044	0.05 Máx	Calor de Hidratación a 7 días	63.72	Cal/g ---
				Calor de Hidratación a 28 días	72.42	Cal/g ---

* Corresponde a 2da. Quincena Agosto 2018

FORMATO UCC-20-10000-008-04


Ing. Miguel Quispe A.
División Química

INFORME DE CALIDAD

MARCA **Andino Tipo IP**

TIPO DE CEMENTO: **Portland Tipo IP**

Fecha:

ESPECIFICACIÓN VIGENTE: **ASTM C-595**
NTP 334.090
2da. Quincena Setiembre 2018
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

PRUEBAS FÍSICAS:	Result. Ensayo	Spec. Limite	ANÁLISIS QUÍMICO:	Result. Ensayo	Spec. Limite
1) Superficie específica (BLAINE)			1) Pérdida por Ignición.	3.26	% 5.0 Máx.
	cm ² /gr.	4512	2) Residuo Insoluble	18.80	% ---
2) Tiempo de fraguado (VICAT)			3) Dióxido de Silicio (SiO ₂)	29.90	% ---
	Minutos		4) Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	6.77	% ---
	INICIAL	116	5) Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	3.15	% ---
	FINAL	285	6) Óxido de Calcio (CaO)	50.52	% ---
3) Expansión Autoclave			7) Óxido de Magnesio (MgO)	1.76	% 6.0 Máx.
	%	-0.02	8) Trióxido de Azufre (SO ₃)	2.68	% 4.0 Máx.
4) Contenido de Aire, en volumen			9) Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.25	% ---
	%	5.04	10) Óxido de Potasio (K ₂ O)	1.32	% ---
			FASES MINERALÓGICAS SEGÚN BOGUE		
5) Resistencia a la compresión			SILICATO TRICÁLCICO (C ₃ S)	----	% ---
	Mpa	(lb/pulg ²)	SILICATO DICÁLCICO (C ₂ S)	----	% ---
a 3 Días	17.81	2590	ALUMINATO TRICÁLCICO (C ₃ A)	----	% ---
a 7 Días	24.07	3500	FERROALUMINATO TETRACÁLCICO (C ₄ AF)	----	% ---
a 28 Días *	33.56	4880			
6) Densidad					
	(gr/cm ³)	2.97			

REQUISITOS OPCIONALES

7) Falso Fraguado, penetración final	%	90.00	50 Min.	ASTM C 311 ALCALI DISPONIBLE (Calculado)	0.62	%	---
				PORCENTAJE ADICION DE PUZOLANA	23.49	%	---
8) Resistencia a sulfatos				Calor de Hidratación a 7 días	60.21	Cal/g	70 Máx.
Expansión a 180 días	%	0.03	0.05 Máx.	Calor de Hidratación a 28 días	65.18	Cal/g	80 Máx.

* Corresponde a 2da. Quincena Agosto 2018

FORMATO UCC-20-10000-008-04


Ing. Miguel Quispe A.
División Química

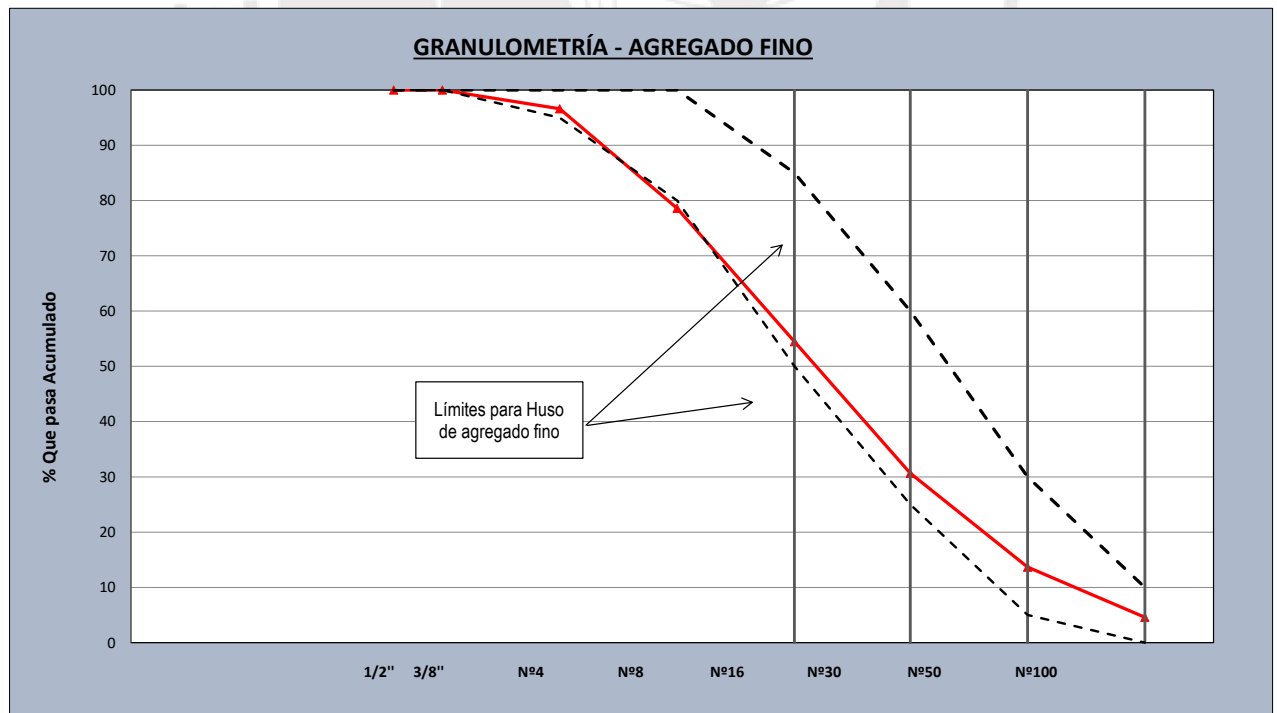
ANEXO N°3: ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS DE LOS AGREGADOS



REPORTE DE ENSAYOS - AGREGADO FINO #1

Proyecto:	Tesis	Fecha:	12/07/2018
Cantera:	UNICON	Técnico:	María Elena Ahumada Ponce

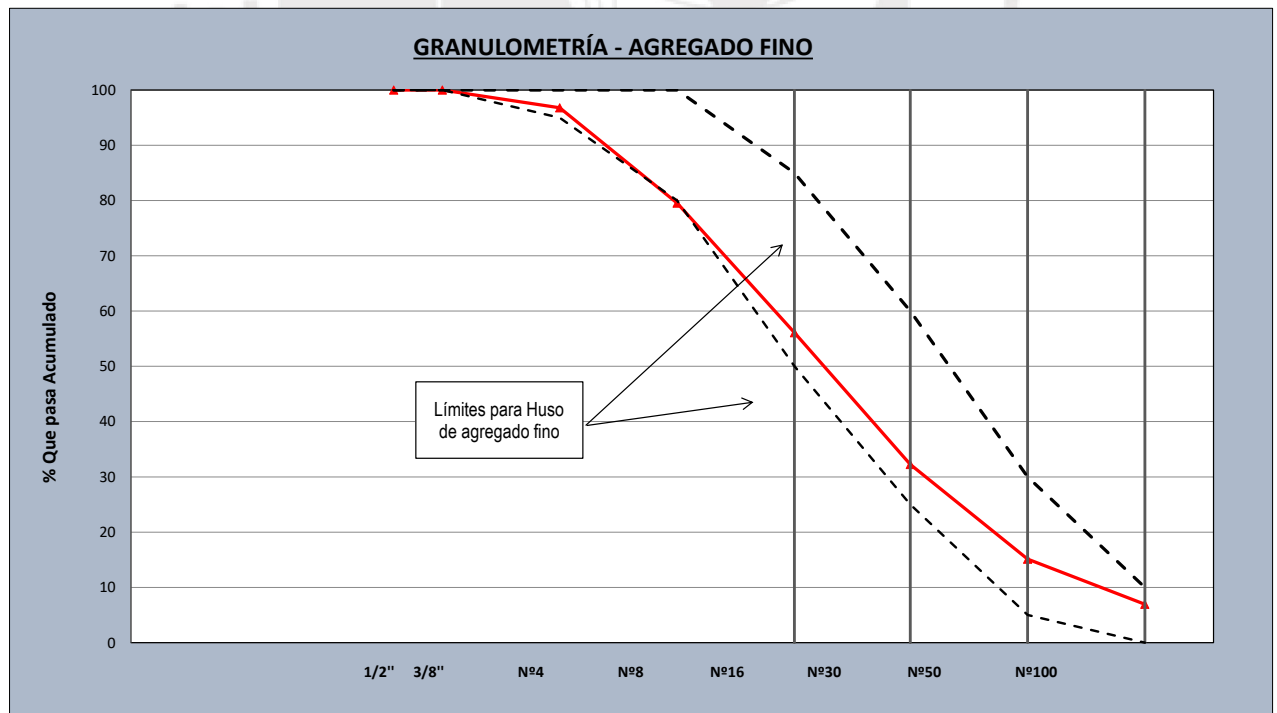
Peso Inicial (g)		534.50		ERROR (máx 0.3%)		-0.226		ACEPTABLE	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136)						HUSO (ASTM C-33)			
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	Límite inferior		Limite superior	
1/2"	12.70	0.00	0.0	0.0	100.0	100		100	
3/8"	9.53	0.00	0.0	0.0	100.0	100		100	
Nº4	4.76	18.14	3.4	3.4	96.6	95		100	
Nº8	2.38	96.01	18.0	21.4	78.6	80		100	
Nº16	1.19	128.64	24.1	45.5	54.5	50		85	
Nº30	0.60	127.05	23.8	69.4	30.6	25		60	
Nº50	0.30	90.59	17.0	86.3	13.7	5		30	
Nº100	0.15	48.37	9.1	95.4	4.6	0		10	
Fondo		24.49	4.6	100.0	0.0	-		-	
TOTAL		533.29	100.0	Modulo fineza		3.21			
Modulo de Fineza = Suma de % retenidos acumulados de mallas (3",1 1/2",3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100)/100									



REPORTE DE ENSAYOS - AGREGADO FINO #2

Proyecto:	Tesis	Fecha:	12/07/2018
Cantera:	UNICON	Técnico:	María Elena Ahumada Ponce

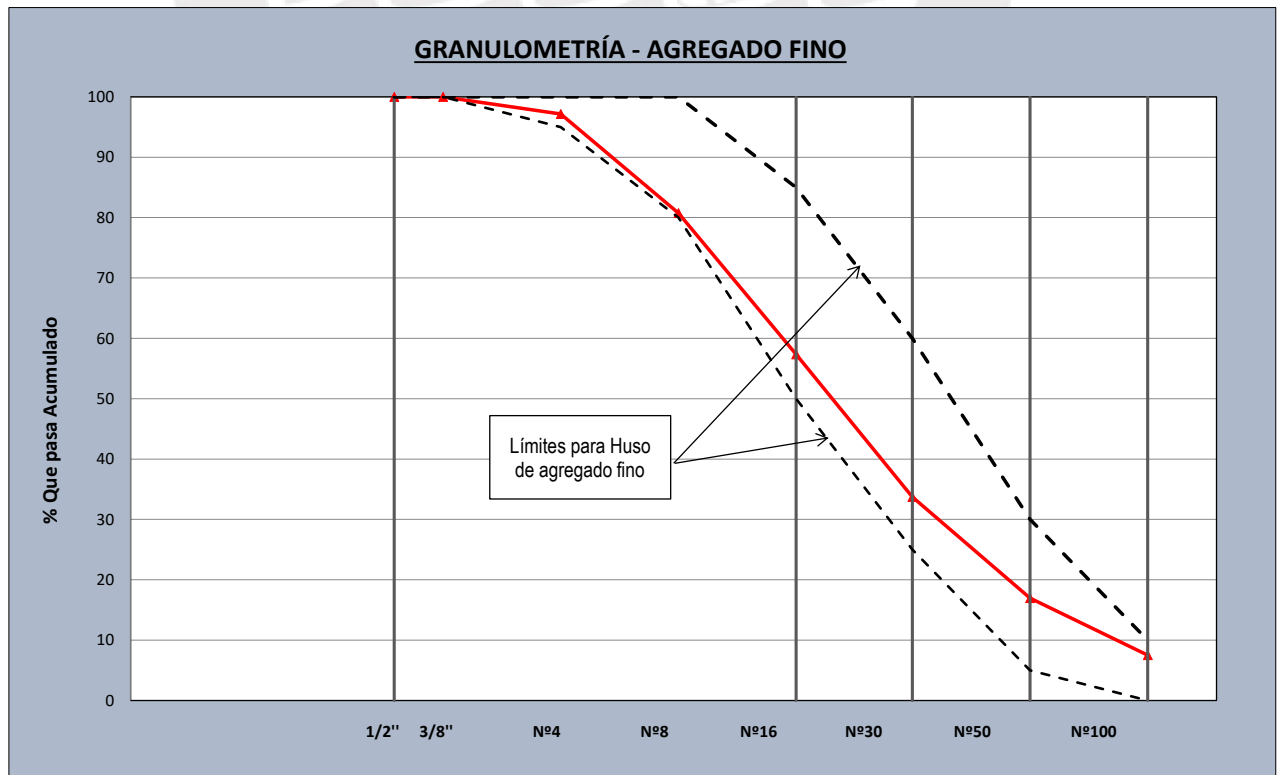
Peso Inicial (g)		534.50			ERROR (máx 0.3%)		-0.187		ACEPTABLE		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136)							HUSO (ASTM C-33)				
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)		Límite inferior		Limite superior		
1/2"	12.70	0.00	0.0	0.0	100.0		100		100		
3/8"	9.53	0.00	0.0	0.0	100.0		100		100		
Nº4	4.76	17.12	3.2	3.2	96.8		95		100		
Nº8	2.38	92.03	17.3	20.5	79.5		80		100		
Nº16	1.19	125.15	23.5	43.9	56.1		50		85		
Nº30	0.60	127.20	23.8	67.8	32.2		25		60		
Nº50	0.30	91.37	17.1	84.9	15.1		5		30		
Nº100	0.15	43.59	8.2	93.1	6.9		0		10		
Fondo		37.04	6.9	100.0	0.0		-		-		
TOTAL		533.50	100.0	Modulo fineza			3.13				
Modulo de Fineza = Suma de % retenidos acumulados de mallas (3",1 1/2",3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100)/100											



REPORTE DE ENSAYOS - AGREGADO FINO #3

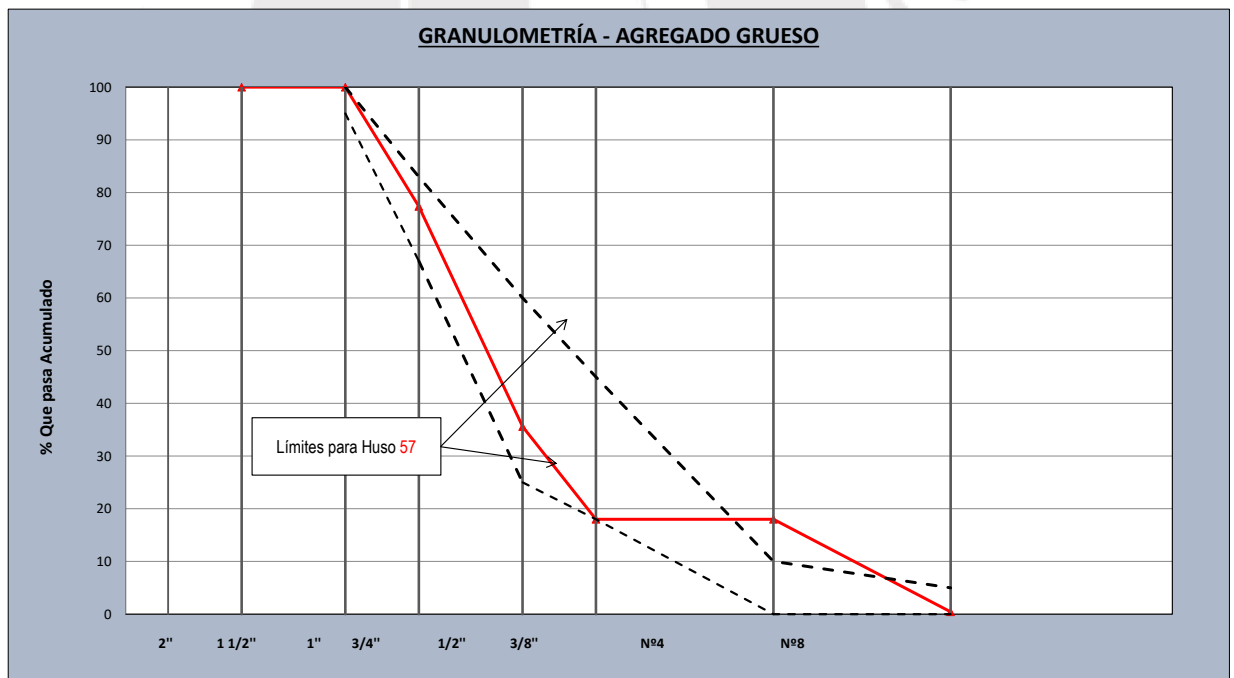
Proyecto	TESIS	Fecha:	12/07/2018
Cantera:	UNICON	Técnico:	María Elena Ahumada Ponce

Peso Inicial (g)	534.50	ERROR (máx 0.3%)				-0.284	ACEPTABLE
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136)						HUSO (ASTM C-33)	
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	Límite inferior	Límite superior
1/2"	12.70	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100
3/8"	9.53	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100
Nº4	4.76	15.20	2.9	2.9	97.1	95	100
Nº8	2.38	87.33	16.4	19.2	80.8	80	100
Nº16	1.19	124.89	23.4	42.7	57.3	50	85
Nº30	0.60	125.79	23.6	66.3	33.7	25	60
Nº50	0.30	89.45	16.8	83.1	16.9	5	30
Nº100	0.15	50.28	9.4	92.5	7.5	0	10
Fondo		40.04	7.5	100.0	0.0	-	-
TOTAL		532.98	100.0	Modulo fineza		3.07	
Modulo de Fineza = Suma de % retenidos acumulados de mallas (3",1 1/2",3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100)/100							



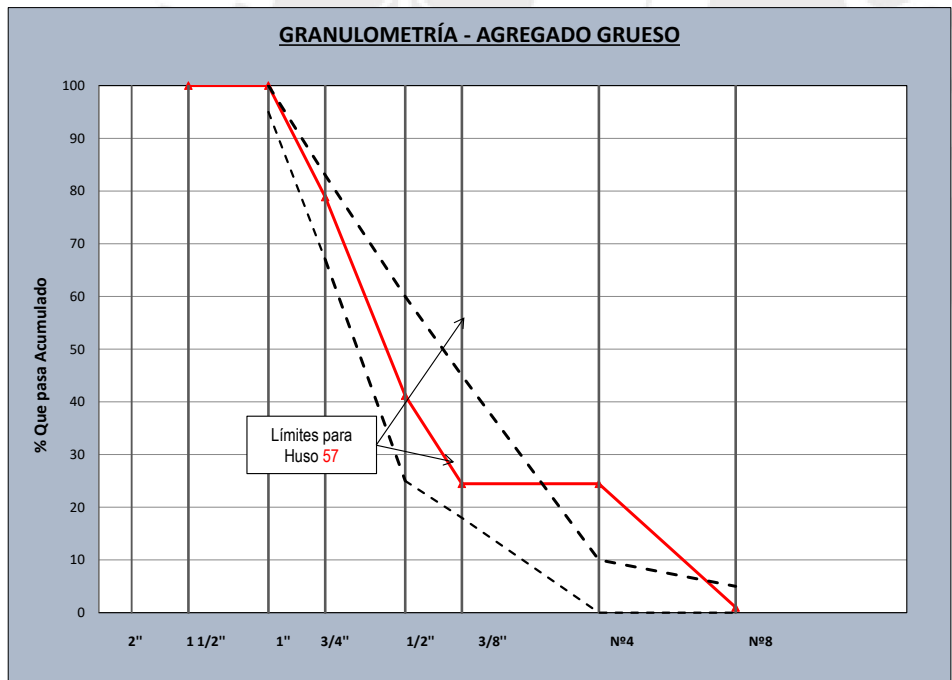
ENSAYOS AGREGADO GRUESO #1			
Proyecto:	TESIS	Fecha:	12/07/2018
Cantera:	UNICON	Técnico:	María Elena Ahumada Ponce

Peso Inicial	10100.000					ERROR (máx 0.3%)	0.099	ACEPTABLE
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136)						HUSO 57 (ASTM C33)		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	Límite inferior	Limite superior	
2"	50.80	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100	
1 1/2"	38.10	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100	
1"	25.40	0.00	0.0	0.0	100.0	95	100	
3/4"	19.05	2288.00	22.6	22.6	77.4	67	83	
1/2"	12.70	4225.00	41.8	64.4	35.6	25	60	
3/8"	9.53	1776.00	17.6	82.0	18.0	18	45	
Nº4	4.76	0.00	0.0	82.0	18.0	0	10	
Nº8	2.38	1776.00	17.6	99.6	0.4	0	5	
Fondo		45.00	0.4	100.0	0.0	-	-	
TOTAL		10110.00	100.0	Modulo fineza		6.86		
Modulo de Fineza = Suma de % retenidos acumulados de mallas (3",1 1/2",3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100)/100								



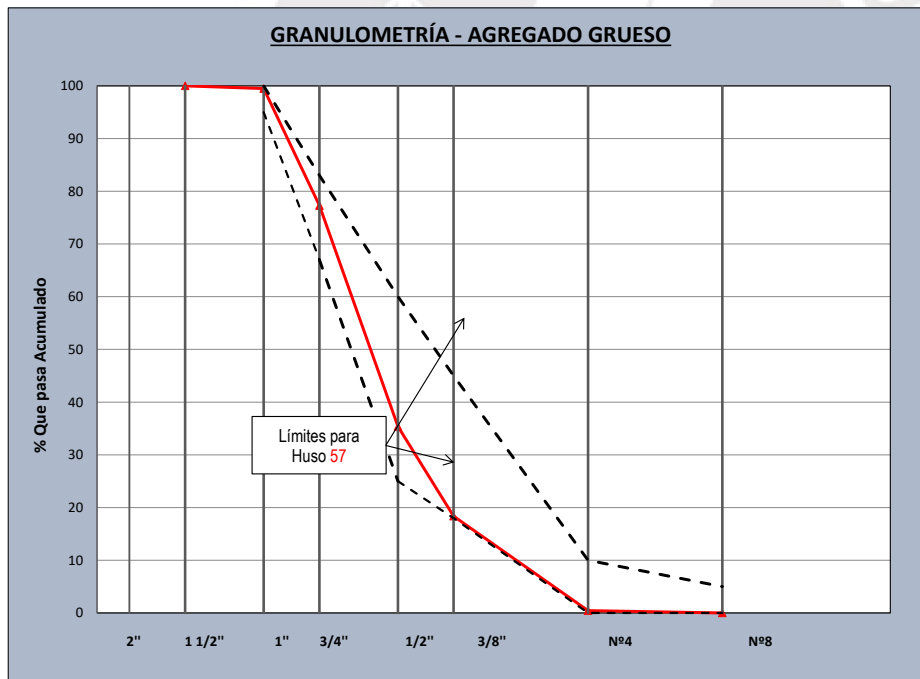
ENSAYOS AGREGADO GRUESO #2			
Proyecto:	TESIS	Fecha:	12/07/2018
Cantera:	UNICON	Técnico:	María Elena Ahumada Ponce

Peso Inicial (g)		10100.000		ERROR (máx 0.3%)		0.119		ACEPTABLE	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136)						HUSO 57 (ASTM C33)			
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	Límite inferior		Limite superior	
2"	50.80	0.00	0.0	0.0	100.0	100		100	
1 1/2"	38.10	0.00	0.0	0.0	100.0	100		100	
1"	25.40	0.00	0.0	0.0	100.0	95		100	
3/4"	19.05	2136.00	21.1	21.1	78.9	67		83	
1/2"	12.70	3811.00	37.7	58.8	41.2	25		60	
3/8"	9.53	1692.00	16.7	75.5	24.5	18		45	
Nº4	4.76	0.00	0.0	75.5	24.5	0		10	
Nº8	2.38	2371.00	23.4	99.0	1.0	0		5	
Fondo		102.00	1.0	100.0	0.0	-		-	
TOTAL		10112.00	100.0	Modulo fineza		6.71			
Modulo de Fineza = Suma de % retenidos acumulados de mallas (3",1 1/2",3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100)/100									



ENSAYOS AGREGADO GRUESO #3			
Proyecto:	TESIS	Fecha:	12/07/2018
Cantera:	UNICON	Técnico:	María Elena Ahumada Ponce






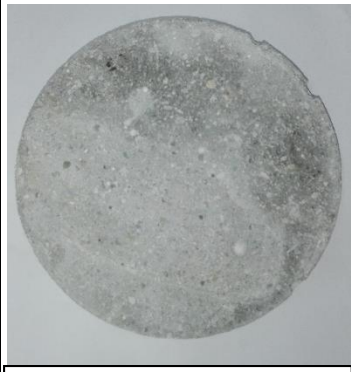




Peso Inicial	10100.000	ERROR (máx 0.3%)				-0.050	ACEPTABLE
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136)						HUSO 57 (ASTM C33)	
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Peso retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	Límite inferior	Límite superior
2"	50.80	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100
1 1/2"	38.10	0.00	0.0	0.0	100.0	100	100
1"	25.40	50.00	0.5	0.5	99.5	95	100
3/4"	19.05	2244.00	22.2	22.7	77.3	67	83
1/2"	12.70	4231.00	41.9	64.6	35.4	25	60
3/8"	9.53	1718.00	17.0	81.7	18.3	18	45
Nº4	4.76	1807.00	17.9	99.6	0.4	0	10
Nº8	2.38	45.00	0.4	100.0	0.0	0	5
Fondo		0.00	0.0	100.0	0.0	-	-
TOTAL		10095.00	100.0	Modulo fineza		7.04	
Modulo de Fineza = Suma de % retenidos acumulados de mallas (3",1 1/2",3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100)/100							













ANEXO N°4: PANEL FOTOGRÁFICO







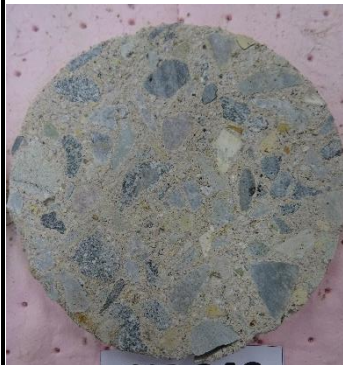





INSPECCIÓN VISUAL EN MUESTRAS CON CEMENTO TIPO I EN ÁCIDO SULFÚRICO

				
CICO Fecha: 13/09/18	CIC1 Fecha: 27/09/18	CIC1 Fecha: 11/10/18	CIC4 Fecha: 26/10/18	CIC4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CICO	Réplica: CIC1	Réplica: CIC1	Réplica: CIC4	Réplica: CIC4
Fecha: 21/09/18	Fecha: 05/10/18	Fecha: 19/10/18	Fecha: 02/11/18	Fecha: 16/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas
				
CIM0 Fecha: 13/09/18	CIM4 Fecha: 27/09/18	CIM1 Fecha: 11/10/18	CIM4 Fecha: 26/10/18	CIM4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CIM0	Réplica: CIM1	Réplica: CIM1	Réplica: CIM4	Réplica: CIM4
Fecha: 21/09/18	Fecha: 05/10/18	Fecha: 19/10/18	Fecha: 02/11/18	Fecha: 16/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas


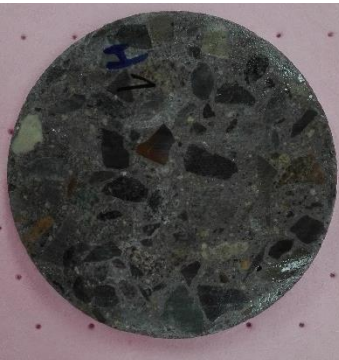
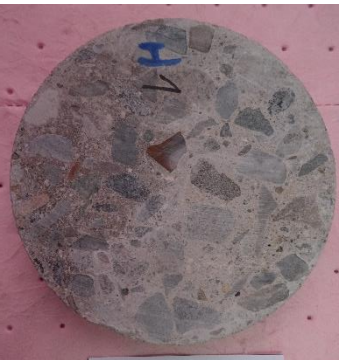
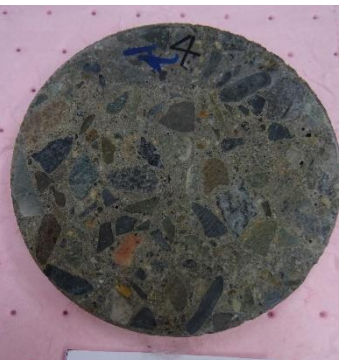






INSPECCIÓN VISUAL EN MUESTRAS CON CEMENTO TIPO V EN ÁCIDO SULFÚRICO

				
CVC0 Fecha: 13/09/18	CVC1 Fecha: 27/09/18	CVC1 Fecha: 11/10/18	CVC4 Fecha: 26/10/18	CVC4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CVC0	Réplica: CVC1	Réplica: CVC1	Réplica: CVC4	Réplica: CVC4
Fecha: 21/09/18	Fecha: 05/10/18	Fecha: 19/10/18	Fecha: 02/11/18	Fecha: 16/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas
				
CVM0 Fecha: 13/09/18	CVM1 Fecha: 27/09/18	CVM1 Fecha: 11/10/18	CVM4 Fecha: 26/10/18	CVM4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CVM0	Réplica: CVM1	Réplica: CVM1	Réplica: CVM4	Réplica: CVM4
Fecha: 21/09/18	Fecha: 05/10/18	Fecha: 19/10/18	Fecha: 02/11/18	Fecha: 16/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas


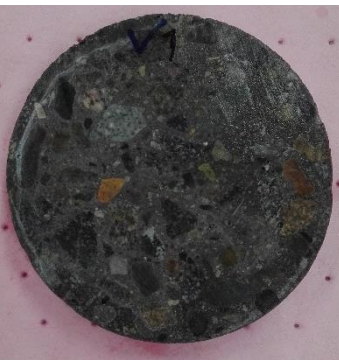


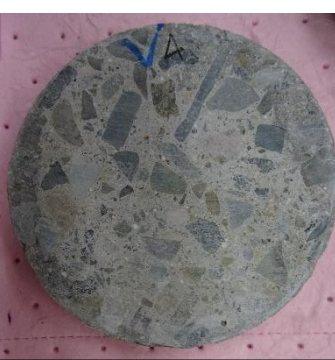

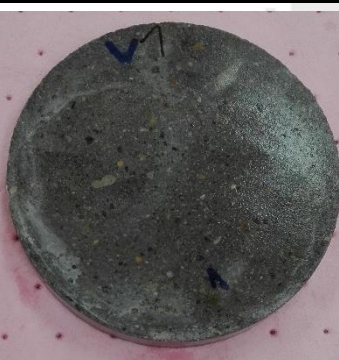
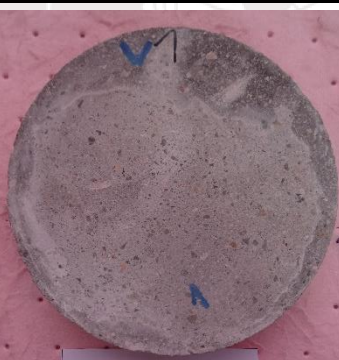


INSPECCIÓN VISUAL EN MUESTRAS CON CEMENTO TIPO IP EN ÁCIDO SULFÚRICO

				
CIPC0 Fecha: 13/09/18	CIPC1 Fecha: 27/09/18	CIPC1 Fecha: 11/10/18	CIPC4 Fecha: 26/10/18	CIPC4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CIPC0	Réplica: CIPC1	Réplica: CIPC1	Réplica: CIPC4	Réplica: CIPC4
Fecha: 21/09/18	Fecha: 05/10/18	Fecha: 19/10/18	Fecha: 02/11/18	Fecha: 16/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas
				
CIPM0 Fecha: 13/09/18	CIPM1 Fecha: 27/09/18	CIPM1 Fecha: 11/10/18	CIPM4 Fecha: 26/10/18	CIPM4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CIPM0	Réplica: CIPM1	Réplica: CIPM1	Réplica: CIPM4	Réplica: CIPM4
Fecha: 21/09/18	Fecha: 05/10/18	Fecha: 19/10/18	Fecha: 02/11/18	Fecha: 16/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas







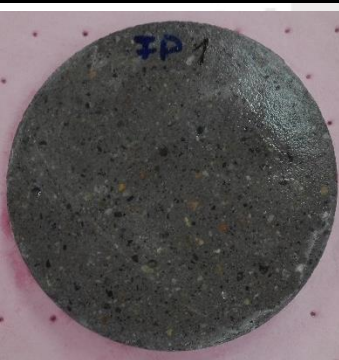
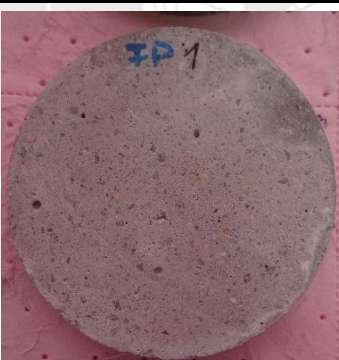
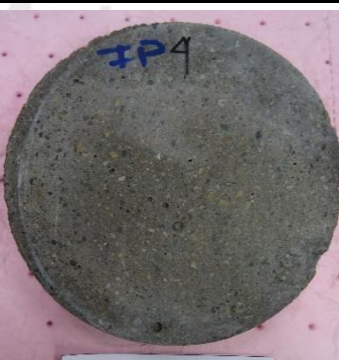

INSPECCIÓN VISUAL EN MUESTRAS CON CEMENTO TIPO I EN AGUA DESTILADA

				
CICO Fecha: 13/09/18	CIC1 Fecha: 27/09/18	CIC1 Fecha: 11/10/18	CIC4 Fecha: 26/10/18	CIC4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CICO	Réplica: CIC1	Réplica: CIC1	Réplica: CIC4	Réplica: CIC4
Fecha: 13/09/18	Fecha: 27/09/18	Fecha: 24/10/18	Fecha: 26/10/18	Fecha: 08/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas
				
CIM0 Fecha: 13/09/18	CIM4 Fecha: 27/09/18	CIM1 Fecha: 11/10/18	CIM4 Fecha: 26/10/18	CIM4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CIM0	Réplica: CIM1	Réplica: CIM1	Réplica: CIM4	Réplica: CIM4
Fecha: 13/09/18	Fecha: 27/09/18	Fecha: 24/10/18	Fecha: 26/10/18	Fecha: 08/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas

INSPECCIÓN VISUAL EN MUESTRAS CON CEMENTO TIPO V EN AGUA DESTILADA

				
CVC0 Fecha: 13/09/18	CVC1 Fecha: 27/09/18	CVC1 Fecha: 11/10/18	CVC4 Fecha: 26/10/18	CVC4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CVC0	Réplica: CVC1	Réplica: CVC1	Réplica: CVC4	Réplica: CVC4
Fecha: 13/09/18	Fecha: 27/09/18	Fecha: 24/10/18	Fecha: 26/10/18	Fecha: 08/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas
				
CVM0 Fecha: 13/09/18	CVM1 Fecha: 27/09/18	CVM1 Fecha: 11/10/18	CVM4 Fecha: 26/10/18	CVM4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CVM0	Réplica: CVM1	Réplica: CVM1	Réplica: CVM4	Réplica: CVM4
Fecha: 13/09/18	Fecha: 27/09/18	Fecha: 24/10/18	Fecha: 26/10/18	Fecha: 08/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas

INSPECCIÓN VISUAL EN MUESTRAS CON CEMENTO TIPO IP EN AGUA DESTILADA

				
CIPC0 Fecha: 13/09/18	CIPC1 Fecha: 27/09/18	CIPC1 Fecha: 11/10/18	CIPC4 Fecha: 26/10/18	CIPC4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CIPC0	Réplica: CIPC1	Réplica: CIPC1	Réplica: CIPC4	Réplica: CIPC4
Fecha: 13/09/18	Fecha: 27/09/18	Fecha: 24/10/18	Fecha: 26/10/18	Fecha: 08/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas
				
CIPM0 Fecha: 13/09/18	CIPM1 Fecha: 27/09/18	CIPM1 Fecha: 11/10/18	CIPM4 Fecha: 26/10/18	CIPM4 Fecha: 08/11/18
Réplica: CIPM0	Réplica: CIPM1	Réplica: CIPM1	Réplica: CIPM4	Réplica: CIPM4
Fecha: 13/09/18	Fecha: 27/09/18	Fecha: 24/10/18	Fecha: 26/10/18	Fecha: 08/11/18
Tiempo: 0 semanas	Tiempo: 2 semanas	Tiempo: 4 semanas	Tiempo: 6 semanas	Tiempo: 8 semanas